

Resum

En els últims 6 anys, l'equip de l'escola ETSEIB Motorsport, ha estat competint en la Formula Student en la categoria elèctrica. Any rere any, l'equip ha anat incorporant millores per tal d'augmentar el rendiment i la competitivitat del monoplaça.

En el departament de tren de potència, Powertrain, un dels principals centres d'atenció en els darrers anys ha estat la bateria d'alt voltatge del cotxe. Des del CAT07e, any 2013, l'equip utilitza una química de cel·la, Liti-Polímer de tipus Pouch. Molt versàtil pel que fa en termes energètics, ja que en el mercat existeixen una gran varietat. Així com a nivell geomètric, que gràcies a la seva forma prismàtica, les cel·les són fàcilment empaquetades i permeten generar la geometria necessària per tal d'adaptar-se al seu entorn.

No obstant, aquesta versatilitat comporta un seguit de reptes. Un dels més destacats és el connexionat de potència, la connexió entre cel·les i per on hi circula el corrent necessari per impulsar el monoplaça.

L'objectiu principal del projecte és donar una visió de l'evolució en les darreres dues temporades de la bateria. Es presenta el disseny de la bateria de CAT09e i posteriorment, una temporada després i amb l'experiència adquirida, s'indica tota l'argumentació així com un seguit de proves al laboratori d'electrònica de potència, que recolzen els canvis introduïts per a la nova bateria, aquest cop per al CAT10e.

Un dels altres punts d'atenció d'aquest projecte és el dimensionament de l'energia. Es va poder confirmar durant les competicions que l'energia de la bateria del CAT09e no era suficient per a treure el màxim rendiment del monoplaça. Així doncs es dedicaran varies jornades de proves per a estudiar quina hauria de ser l'energia per tal de que el CAT10e pugui realitzar la prova de resistència a un ritme òptim.

Finalment és intenció d'aquest projecte, transmetre la visió i les recomanacions, així com els errors de disseny i fabricació remarcats pels inspectors de la competició. Especialment aprofitant la creació d'una nova fase de verificacions en la competició de *Formula Student Germany* anomenada *Accumulator check*, una fase prèvia a la inspecció elèctrica del cotxe on les bateries dels equips són avaluades en termes de seguretat per l'organització de competició. Avaluació per on passarà la bateria del CAT10e.

Sumari

RESUM	1
SUMARI	2
1. GLOSSARI	5
1.1. Llistat de símbols	5
1.2. Llistat de taules	6
1.3. Llistat de figures	8
2. PREFACI	13
2.1. <i>La Formula Student</i>	13
2.2. ETSEIB Motorsport	16
2.3. Origen del projecte	17
2.4. Motivació	17
3. INTRODUCCIÓ	19
3.1. Objectius del projecte	19
3.2. Abast del projecte	20
4. CAT09E	21
4.1. Descripció de la bateria del CAT09e	21
4.1.1. Disseny mecànic	21
4.1.2. Les cel·les	23
4.1.3. Disseny elèctric	25
4.1.3.1. Configuració elèctrica	25
4.1.3.2. Camí de corrent	28
4.1.3.3. Bus-bars	28
4.1.4. <i>Battery Management System (BMS)</i>	29
4.1.5. Connexionat dels stacks	30
4.1.5.1. Disseny 1	30
4.1.5.2. Disseny 2	31
4.1.6. Muntatge de la bateria	34
4.1.6.1. Connexió entre stacks. <i>Maintenance plugs</i>	34
4.1.6.2. Connexió del BMS	35
4.1.7. Seguretat i gestió de la bateria. Zona de control.	36

4.1.7.1. Accumulator Isolation Relays (AIR's) – Relés.....	36
4.1.7.2. Fusible.....	38
4.1.7.3. Circuit de pre-càrrega i descàrrega.....	38
4.1.7.4. <i>Insulation Monitoring Device</i> (IMD)	39
4.1.7.5. <i>Accumulator indicator</i>	41
4.1.7.6. Sensor de corrent	42
4.1.7.7. <i>Energy Meter</i>	43
4.1.7.8. Circuit de control	43
4.1.7.9. <i>High Voltage Disconnect</i> (HVD).....	43
4.1.7.10. Circuit de control	45
4.1.7.11. Muntatge de la zona de control.....	45
4.1.8. Refrigeració	48
4.2. Comentaris i possibles camins de millora.....	50
5. MILLORES INTRODUÏDES AL CAT10E	52
5.1. Dimensionament de l'energia	52
5.1.1. Pèrdues degudes al <i>voltage drop</i>	53
5.1.2. Proves en pista	56
5.1.3. Energia útil i teòrica	57
5.1.4. Les cel·les i configuració elèctrica	58
5.1.4.1. 104s3p	60
5.1.4.2. 105s3p	60
5.1.4.3. Noves consideracions.....	61
5.1.5. Configuració elèctrica final i cel·la escollida.....	63
5.1.6. Camí de corrent	66
5.2. Connexionat de potència	67
5.2.1. Soldadura per ultrasò	67
5.2.2. Experimentació dels materials de les busbars.....	72
5.2.3. Conclusions experimentals	79
5.2.4. Disposició espacial de les cel·les.	80
5.2.4.1. Empaquetament de les cel·les. Mòdul i <i>stack</i>	81
5.2.5. Connexió entre <i>stacks</i> . <i>Maintenance plug</i>	83
5.3. El BMS	86
5.3.1. <i>FreeSafe Extended FS-XT</i>	87

5.3.1.	<i>FreeSafe FS02-M/S</i>	90
5.3.1.1.	Sensat de les cel·les	92
5.3.2.	BMS ETSEIB Motorsport	93
5.4.	Gestió de la bateria. Part de control	95
5.4.1.	Fusible	95
5.4.2.	<i>Circuit de pre-càrrega i descàrrega</i>	96
5.4.3.	<i>Energy Meter</i>	96
5.4.4.	<i>High Voltage Disconnect (HVD)</i>	98
5.4.5.	Muntatge de la zona de control	99
5.5.	Refrigeració.....	102
6.	ESTUDI ECONÒMIC	105
6.1.	Recursos humans.....	105
6.2.	Recursos materials	106
6.3.	Recursos de desenvolupament.....	107
6.4.	Cost total del projecte	108
7.	IMPACTE AMBIENTAL	109
7.1.	Cel·les	109
7.2.	Alumini	110
7.3.	Poliamida	110
7.4.	Plaques de circuit imprès (PCB).....	111
8.	PLANIFICACIÓ DEL PROJECTE	112
9.	CONCLUSIONS	113
	AGRAÏMENTS	115
	BIBLIOGRAFIA	116
	Referències bibliogràfiques.....	116
	Bibliografia complementària.....	117

1. Glossari

1.1. Llistat de símbols

BMS	<i>Battery Management System</i> . Sistema de control de la bateria
AIR	<i>Accumulator Isolation Relay</i> . Relé de potència
EM	<i>Energy Meter</i> . Component que mesura l'energia de la bateria
IMD	<i>Isolation Monitoring Device</i> . Component de seguretat
HVD	<i>High Voltage Disconnect</i> . Interruptor mecànic de la bateria
FSG	<i>Formula Student Germany</i>
Xs	Configuració de cel·les X sèrie
Nseries	Nombre de cel·les en sèrie
3p	Configuració de cel·les 3 paral·lel
Nparal·lel	Nombre de cel·les en paral·lel
C	Capacitat
Cbat	Capacitat de la bateria
Ccel·la	Capacitat de la cel·la
E	Energia
Eendurance	Energia necessària per la prova del <i>Endurance</i>
U	Tensió
Uinversor	Tensió màxima d'entrada de l'inversor
Umax_cel·la	Tensió màxima de la cel·la
Unom_cel·la	Tensió nominal de la cel·la

Unom_bateria Tensió nominal de la bateria

Vdrop *Voltage drop*

1.2. Llistat de taules

Taula 4.1: Taula d'especificacions de la cel·la escollida per al CAT09e [8].....	24
Taula 4.2: Principals especificacions de l'inversor [9]	25
Taula 4.3: Especificacions de la bateria de CAT09e	27
Taula 4.4: Especificacions d'un stack	27
Taula 4.5: Característiques principals del fusible.....	38
Taula 4.6: Paràmetres de l'IMD	40
Taula 4.7: Principals característiques del sensor de corrent [14]	42
Taula 5.1: Energia perduda degut al voltage drop. Cel·les CAT09e	53
Taula 5.2: Energia perduda degut al voltage drop. Cel·les CAT10e	54
Taula 5.3: Energia perduda degut al voltage drop en el CAT09e.....	55
Taula 5.4: Proves realitzades el 26-09-2016 a Montmeló.....	57
Taula 5.5: Energia útil i teòrica de CAT09e i CAT10e	58
Taula 5.6: Principals característiques de les cel·les 389, 392, 407, 411 i 426.....	59
Taula 5.7: Dades mecàniques de la bateria del CAT10e introduïdes al programa.....	62
Taula 5.8: Paràmetres límit de la bateria introduïts al programa	62
Taula 5.9: Taula resum de les possibles configuracions per a la bateria del CAT10e	63
Taula 5.10: Taula d'especificacions de la cel·la escollida per al CAT10e [16].....	65
Taula 5.11: Especificacions de la bateria de CAT10e	65
Taula 5.12: Especificacions d'un stack	65

Taula 5.13: Especificacions d'un mòdul.....	66
Taula 5.14: Comparació de temperatures entre connexió cargolada i connexió soldada per ultrasò	68
Taula 5.15: Temperatures finals del muntatge 1s3p.....	70
Taula 5.16: Resistències equivalents dels muntatges cargolat i soldat 1s3p	71
Taula 5.17: Valors de resistència equivalent al mateix amperatge de cel·la	71
Taula 5.18: Paràmetres de soldadura.....	73
Taula 5.19: Temperatures finals de la descàrrega estacionària a 30 A.....	74
Taula 5.20: Paràmetres de ressoldadura.....	75
Taula 5.21: Comparativa voltage drop busbar alumini vs coure	77
Taula 5.22: Temperatures finals en la descàrrega de 80 A de la busbar d'alumini	79
Taula 5.23: Característiques principals del fusible.....	95
Taula 6.1 Costos generats per recursos humans	105
Taula 6.2: Costos generats per recursos materials	106
Taula 6.3: Costos addicionals deguts a impostos, taxes i transport	107
Taula 6.4: Costos de desenvolupament.....	107
Taula 6.5: Cost total del projecte	108
Taula 7.1: Composició de les cel·les	109
Taula 8.1: Planificació del projecte	112

1.3. Llistat de figures

Figura 2.1: Distribució de la puntuació en les diferents tipus de proves	14
Figura 2.2: Esquema del circuit de Skid Pad	15
Figura 2.3: Distribució detallada de la puntuació [1]	15
Figura 2.4: El CAT09e.	16
Figura 4.1: Caixa de bateries CAT09e.....	21
Figura 4.2: Stack.....	22
Figura 4.3: Explosionat de la posició de les cel·les a la bateria de CAT09e.....	22
Figura 4.4: Les cel·les i les seves dimensions	24
Figura 4.5: Inversor Unitek BAMOCAR D3 400-400 RS.....	25
Figura 4.6: Article EV3.3.3 de la normativa FSAE 2017-2018	27
Figura 4.7: Esquema del camí de corrent.....	28
Figura 4.8: Situació del BMS en un stack	29
<i>Figura 4.9: Placa de fusibles Figura 4.10: Connexió de la placa de fusibles al BMS.....</i>	<i>30</i>
Figura 4.11: Encaix de les femelles en la xapa inferior.....	30
Figura 4.12: Xapa superior	31
Figura 4.13: Distribució del cablejat en un stack.....	31
Figura 4.14: Muntatge de la nova xapa inferior.....	33
Figura 4.15: Nou connexionat de potència	33
Figura 4.16: Connexió dels Maintenance plug entre dos tapes dels stacks	34
Figura 4.17: Maintenance plug cargolats entre dos tapes dels stacks	35
Figura 4.18: Articles EV 3.6.1 i EV 3.6.2 de la normativa de FSG2017	36
Figura 4.19: Característiques del relé de potència	37

Figura 4.20: Esquema del relé de potència	37
Figura 4.21: Esquemàtic del circuit de pre-càrrega i descàrrega.....	39
Figura 4.22: Bender A-ISOMETER IR155-3204	40
Figura 4.23: Article EV 3.4.9 de la normativa de FSG2017	41
Figura 4.24: Fotografia de la placa LED del CAT09e i esquemàtic de l'indicador LED.	41
Figura 4.25: Localització de l'indicador LED	42
Figura 4.26: Esquema de dimensions de l'Energy Meter de FSGermany	43
Figura 4.27: Vista explosionada de l'HVD.....	44
Figura 4.28: Localització de l'HVD al CAT09e	44
Figura 4.29: Esquema del connexionat de control.....	45
Figura 4.30: Xassís de poliamida.....	46
Figura 4.31: Tapa per al fusible	46
Figura 4.32: Localització de la tapa del fusible	47
Figura 4.33: Implementació del circuit de control.....	47
Figura 4.34: Implementació del circuit de control.....	48
Figura 4.35: Refrigeració de la bateria del CAT09e.....	49
Figura 4.36: Article EV 3.7.5 de la normativa de FSGermany 2017	51
Figura 5.1: Bateria del CAT10e.....	52
Figura 5.2: Base de dades cel·les Melasta	58
Figura 5.3: Comparació de les diferents configuracions elèctriques.....	59
Figura 5.4: Comparació de configuracions per als paràmetres introduïts de les taules 5.7 i 5.8 i la cel·la número 407.....	62
Figura 5.5: Esquema del camí de corrent de la bateria de CAT10e	66
Figura 5.6: Muntatges 1s3p (a dalt) i 3s1p (a baix).....	67

Figura 5.7: Resultats comparatius de la descàrrega steps per connexió per ultrasò enfront cargolada	68
Figura 5.8: Assaig a 50 A connexió cargolada (colors difuminats) i connexió soldada (colors més forts)	69
Figura 5.9: Muntatges 1s3p amb busbar d'alumini (dreta) i coure (esquerra)	72
Figura 5.10: Resultats comparatius de la descàrrega estacionària a 30 A de busbars d'alumini vs coure.	74
Figura 5.11: Resultats comparatius de la descàrrega de steps per a coure ressoldat	76
Figura 5.12: Resultats comparatius de la descàrrega de steps per alumini vs coure.....	77
Figura 5.13: Evolució del voltatge i temperatura en la descàrrega estacionària a 80 A amb busbar d'alumini.....	78
Figura 5.14: Stack de la bateria de CAT10e (esquerra) i de CAT09e (dreta).....	80
Figura 5.15: Mòdul de fibra de vidre	81
Figura 5.16: Mòdul amb les 24 cel·les	82
Figura 5.17: Caixa de bateries del CAT10e	82
Figura 5.18: Vista explosionada de la posició de les cel·les dins la caixa de bateries.....	83
Figura 5.19: Connector SP6AR-N/25 (esquerra) i B6AR-NS (dreta).	84
Figura 5.20: Connexió dels Maintenance plug entre els stacks de la bateria de CAT10e...	85
Figura 5.21: Aplicació de la peça per a mantenir el Maintenance plug en forma de U.....	85
Figura 5.22: Desbalanceig de les cel·les en dos grups	86
Figura 5.23: Desbalanceig de les cel·les en varis grups.....	87
<i>Figura 5.24: FreeSafe Extended FS-XT (esquerra) i FreeSafe FS02-M/S (dreta)</i>	<i>88</i>
Figura 5.25: Aplicació de la FS-XT a la bateria del CAT09e.....	88
Figura 5.26: Article EV 3.7.9 de la normativa de FSG2017	89
Figura 5.27: Implementació del BMS a la bateria del CAT10e	90

Figura 5.28: Article EV 3.7.4 de la normativa de FSG2017	91
Figura 5.29: Placa auxiliar de sensat de temperatura.....	92
Figura 5.30: PCB de sensat de voltatge de les cel·les	92
Figura 5.31: Aplicació de la PCB de sensat en un mòdul de la bateria	93
Figura 5.32: Placa BMS ETSEIB Motorsport	94
Figura 5.33: Implementació del BMS ETSEIB Motorsport	94
Figura 5.34: Localització del circuit de pre-càrrega dins la zona de control.....	96
Figura 5.35: Situació de l'EM dins la caixa d'alumini.....	97
Figura 5.36: Localització de l'EM	97
Figura 5.37: Article EV 4.7.2 de la normativa de FSG2017	98
Figura 5.38: HVD utilitzat al CAT10e	98
Figura 5.39: Localització de l'HVD al CAT10e	99
Figura 5.40: Xassís de poliamida.....	99
Figura 5.41: Tapa per al fusible (esquerra) i tapa per el circuit de pre-càrrega (dreta)	100
Figura 5.42: Màster, placa auxiliar de temperatures i PR	100
Figura 5.43: Vista explosionada de la localització del BMS a la zona de control.....	101
Figura 5.44: Vista isomètrica i planta de la zona de control.....	101
Figura 5.45: Entrada d'aire.....	102
Figura 5.46: Localització de l'entrada d'aire	103
Figura 5.47: Vista seccionada de l'entrada d'aire a i la bateria.	103
Figura 5.48: Extracció de l'aire de la mitjançant ventiladors	104

2. Prefaci

2.1. La *Formula Student*

La *Formula Student* és una competició universitària de caràcter internacional que té com a objectiu que estudiants d'enginyeria realitzin les fases de disseny, construcció i posada a punt d'un vehicle monoplaça tipus fórmula per a poder competir a les proves que tenen lloc a diferents països. Aquesta competició va néixer als Estats Units d'Amèrica l'any 1981 amb el nom de Formula SAE sota la coordinació de la *Society of Automotive Engineering*. L'any 1998 es va realitzar la primera edició en territori europeu a Warwickshire (Regne Unit) impulsada per l'IMechE (*The Institution of Mechanical Engineers*) sota el nom de *Formula Student*. Actualment, es celebren competicions en altres països com Alemanya, Japó, Brasil o Espanya.

La competició estableix una normativa molt estricta a nivell de seguretat [1] que condiciona les fases de disseny i construcció i al mateix temps estableix les regulacions a les proves estàtiques i dinàmiques de la competició. Per altra banda aquesta normativa permet també moltes noves idees, cosa que la fa especialment atractiva ja que s'obté molta llibertat alhora d'innovar i desenvolupar nous dissenys. Tanmateix, la competició ofereix la possibilitat per part dels alumnes que hi formen part d'obtenir un primer contacte amb el món real, aptitud difícilment assolible a les aules.

La competició avalua els aspectes més relacionats amb el monoplaça, com podria ser el rendiment d'aquest, i d'altres no tan directament lligats al vehicle, sinó al projecte en general.

La puntuació global de la competició es divideix en dos tipus de proves diferents:

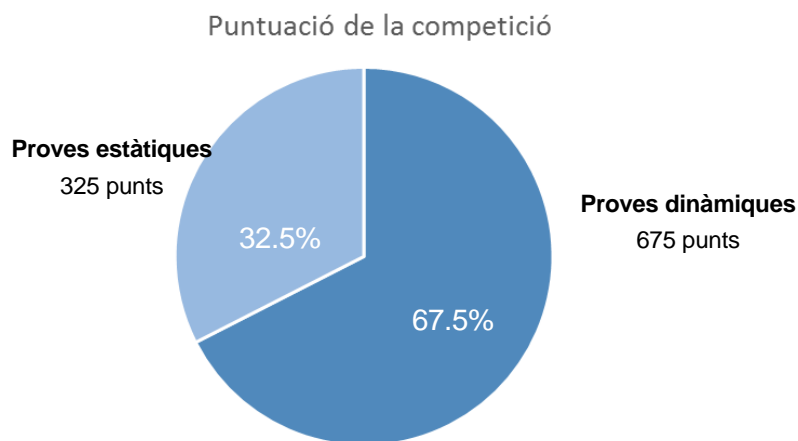


Figura 2.1: Distribució de la puntuació en les diferents tipus de proves

Les proves estàtiques (*Static events*), són aquelles en que no es demostra directament el comportament i les prestacions del monoplaça, sinó que es valora el treball en equip i s'avaluen aspectes més generals que es podrien donar en un projecte real. Aquestes proves són:

- **Business plan presentation (75 punts):** els membres de l'equip responsables presenten davant d'uns jutges un pla de negocis. En aquest es defensa la viabilitat d'una hipotètica empresa dedicada a la fabricació del cotxe i la prestació dels serveis que se'n deriven.
- **Cost and Manufacturing (100 punts):** consisteix en defensar davant d'uns jutges de la manera més detallada possible el cost del vehicle. Des de la tria del material de cada peça, la fabricació de cada una fins al seu muntatge en el conjunt del cotxe.
- **Design (150 punts):** és la prova mare de les estàtiques, on jutges especialitzats en diversos sectors de l'automoció avaluen el disseny del monoplaça i les decisions preses per l'equip.

Per altra banda, en les proves dinàmiques (*Dynamic events*), es demostra la competitivitat del vehicle dissenyat i es posen a prova les seves prestacions en diferents àrees:

- **Acceleration (100 punts):** s'avalua la capacitat d'acceleració. Partint del cotxe aturat es mesura el temps que necessita per recórrer una recta de 75 metres.
- **Skid Pad (75 punts):** l'objectiu d'aquesta prova és mesurar el pas per corba en una pista en forma de vuit, tal i com es mostra a la figura 2.2. El pilot ha de donar dues voltes en cada sentit i la puntuació s'obté d'una equació que té en compte el temps mig en donar les voltes en cada sentit.

- **Autocross (125 punts):** en aquesta prova es posa de manifest la maniobrabilitat del monoplaça en un circuit revirat d'aproximadament uns 800 metres.
- **Endurance (275 punts):** és la prova reina. El monoplaça ha de completar un recorregut molt semblant al de l'*Autocross* però en aquest cas de 22 quilòmetres.
- **Efficiency (100 punts):** es mesura l'energia consumida i el rati de temps per volta durant la prova de l'*Endurance*.

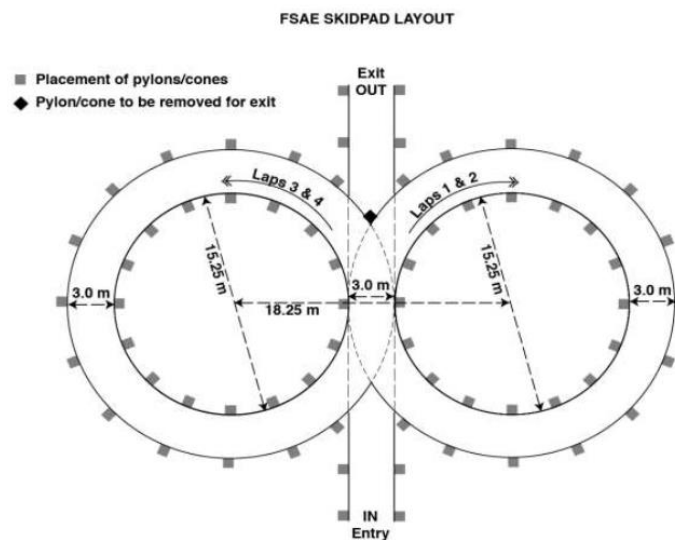


Figura 2.2: Esquema del circuit de *Skid Pad*

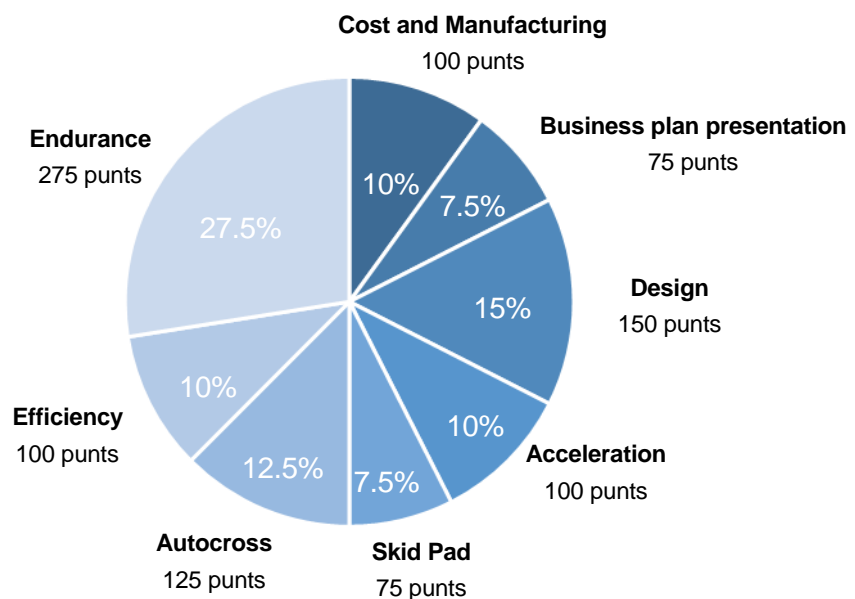


Figura 2.3: Distribució detallada de la puntuació [1]

Al ser l'*Endurance* la prova més exigent, és pensant en aquesta prova per la que es dimensiona la bateria.

2.2. ETSEIB Motorsport

ETSEIB Motorsport és un equip de competició en l'àmbit de l'automoció de l'Escola Tècnica Superior d'Enginyeria Industrial de Barcelona (ETSEIB). És en aquest equip, format per estudiants d'aquesta escola, on s'emmarca el projecte de disseny i millora de la bateria d'un vehicle elèctric de competició per la Formula Student.

L'equip ha participat en aquesta competició des de l'any 2007. A les primeres edicions es van presentar quatre monoplaques de combustió, des del CAT01 fins al CAT04. L'any 2011 es va fer una gran aposta per les noves tecnologies i l'equip va dissenyar i construir el primer vehicle elèctric, el CAT05e.

L'objectiu anual de l'equip és dissenyar, construir i posar a punt un monoplaça que posteriorment és avaluat en diferents competicions emmarcades en la Formula Student. En aquestes, és primordial la justificació de totes les decisions preses en el disseny del monoplaça de forma lògica i fonamentada.

En la temporada 2016-2017 es construirà el desè vehicle i el sisè elèctric, l'anomenat CAT10e. A la figura 2.4 es mostra el cotxe de la temporada passada, el CAT09e.



Figura 2.4: El CAT09e.

2.3. Origen del projecte

Des de la temporada 2011/2012 en què es va iniciar el canvi cap a l'era elèctrica, l'equip s'ha trobat amb nombrosos reptes, especialment en els departaments de tren de potència (*Powertrain*) i electrònica.

En la part dels motors elèctrics es troba que la resposta d'aquest enfront a les consignes d'entrada són molt diferents a les que pot presentar un motor de combustió interna. Per tant, els paràmetres de control i el tipus de control juguen un paper clau en el rendiment del monoplaça.

Per tal d'aconseguir l'ajust òptim del motor apareix un nou element en el sistema: l'inversor.

Finalment un altre element a destacar, i envers al qual gira aquest projecte és la font d'energia: la bateria. Des del CAT05e s'han anat introduint canvis en la bateria: la química de cel·la, la manera d'empaquetar-les, la connexió entre elles, la implementació del *Battery Management System* (BMS), entre d'altres.

Tot i que els canvis introduïts en la bateria, han estat amb la finalitat de millorar-la, fent-la més robusta i fiable, aquest sempre ha estat un dels punts al que més atenció se li ha hagut de donar.

A més a més, cal destacar la ràpida evolució del mercat de l'automoció elèctrica, especialment en l'apartat d'emmagatzematge d'energia, on cada dia apareixen nous elements amb millors prestacions. Fet que, tractant-se d'un equip de competició, s'ha de tenir molt en compte i saber escollir molt bé quines d'aquestes innovacions convé incorporar per fer el monoplaça més competitiu.

L'origen d'aquest projecte es basa doncs en la millora continua de la bateria, amb l'objectiu de convertir aquest element en un element més del sistema. Un element que no hagi de rebre una especial atenció, això voldrà dir que s'ha aconseguit dissenyar i construir una bateria estable, fiable i robusta, aspectes que per si sols augmenten el rendiment del cotxe.

2.4. Motivació

Així doncs, la motivació principal d'aquest projecte ve donada per la necessitat de millorar la bateria del cotxe de la temporada 2015-2016.

A més, cal sumar-hi la motivació que per si sol desperta el projecte, ja que permet a l'estudiant aplicar coneixements teòrics en un repte real, veure com afecten els problemes

del disseny en la fase constructiva, aprendre a fer iteracions en el disseny per tal d'evitar-los i enriquir dinàmiques de treball en grup.

Per altra banda, els conceptes teòrics adquirits durant els quatre anys de grau més la experiència adquirida dissenyant i construint durant el primer any a l'equip ETSEIB Motorsport ajuden a emprendre aquest repte innovador de millora i disseny de la bateria.

A més, es pretén deixar una bona base per a futurs vehicles realitzats per l'equip.

3. Introducció

3.1. Objectius del projecte

Aquest projecte pretén analitzar la bateria del monoplaça de la temporada anterior, el CAT09e, tot analitzant els seus punts febles i els possibles camins de millora per aplicar-los en la fase de disseny del proper monoplaça, el CAT10e.

Un cop determinats aquests camins, s'explotaran un a un per tal d'aconseguir la màxima millora possible tot intentant que aquesta sigui adaptable al CAT10e, un monoplaça amb la mateixa base que el CAT09e.

Concretament aquest projecte tractarà principalment sobre aspectes elèctrics, especialment referents al connexionat de potència i la implementació del BMS. Punts d'on se'n deriven la resta d'objectius:

- Dimensionament de la bateria
- Avaluació i millora en el connexionat de potència, per tal de reduir les pèrdues i augmentar les prestacions.
- Avaluació i millora del sistema de connexionat de potència amb l'objectiu de corregir els defectes en la connexió, el faci més robust i faciliti el seu muntatge i manteniment.
- Canvi de distribució de les cel·les per a millorar la seva refrigeració.
- El *Battery Management System* (BMS)
- Anàlisi i millora de la distribució d'elements de potència i control.
- Cablejat

A més, amb el treball també es pretén establir una guia de disseny per a futures generacions de l'equip.

3.2. Abast del projecte

Són molts aspectes els que s'han de tenir en compte alhora de dissenyar una bateria per a la Formula Student. Pel que fa a l'abast d'aquest projecte, aquest aprofundirà en:

- El dimensionament i disseny de la configuració elèctrica de la bateria.
- L'elecció de les cel·les que formaran la bateria.
- El connexionat de potència.
- El BMS
- El circuit de control i condicionament on apareixen els elements de seguretat com el fusible, els contactors o l'IMD (*Isolation Monitoring Device*) entre d'altres.
- Cablejat

Tot i que es centri en els punts esmentats s'han de tenir en compte altres factors que seran breument explicats:

- La refrigeració.
- El disseny mecànic. Disseny a nivell estructural, que compleixi els requisits marcats per la normativa [1]

Si es vol aprofundir, es poden consultar els següents treballs de final de grau:

- *Caracterització i simulació d'un vehicle de competició elèctric de la Formula Student* (Victor Calvo Serra, 2015) [3]
- *Evolució del sistema d'emmagatzematge d'energia d'un vehicle de la Formula Student* (Miquel Gaig Font, 2015) [4]
- *Disseny i millora del sistema d'evacuació de calor de la bateria d'un cotxe de Formula Student* (Ian Cusiné Sierra, 2016) [5]
- *Anàlisi estructural de solucions constructives de la caixa de bateries per un vehicle de Formula Student elèctric* (Sergi Catalan Sayol, 2016) [6]
- *Disseny i millora del connexionat de potència de la bateria d'un Formula Student* (Manel Duran Moles, 2016) [7]

4. CAT09e

4.1. Descripció de la bateria del CAT09e

4.1.1. Disseny mecànic

El material que es va utilitzar per al disseny i la fabricació de la caixa és l'alumini 6082 amb tractament tèrmic T6.

Per a conformar la geometria de la caixa es va considerar el soldat com la eina més adequada per aconseguir el millor resultat. Així doncs, tant les parets, com el terra i les barres quadrades estaven soldades entre si.

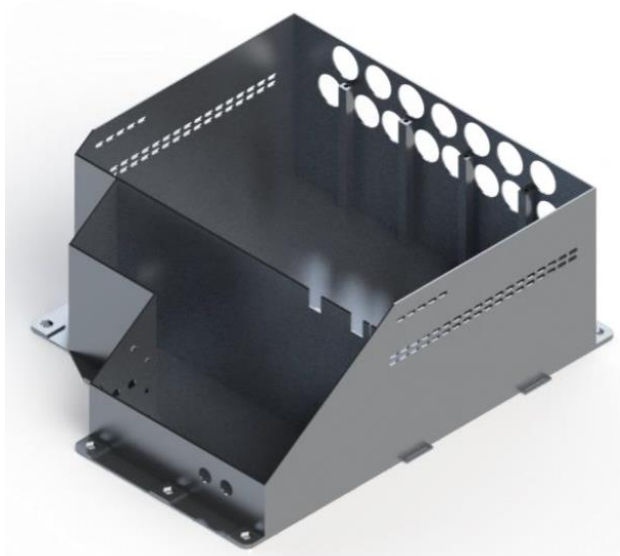


Figura 4.1: Caixa de bateries CAT09e

Com es pot observar, la caixa de bateries estava dividida en dues parts, la part de control i la part de potència.

La part de control és la zona de la caixa de bateries on es poden trobar els elements de seguretat de la bateria, com el fusible, el IMD (*Isulation Monitoring Device*), els AIR's (*Accumulator Isolation Relays*), entre d'altres.

La part de potència és la zona de la bateria on es localitzen les cel·les i la seva connexió, a més, també s'hi troba el BMS.

En aquest disseny, les cel·les es col·locaven dins d'unes estructures d'alumini anomenades *stacks* i aquestes estructures anaven collades a la caixa de bateries utilitzant les barres quadrades que hi ha a la zona de potència.

El material utilitzat pels *stacks* és l'alumini 5754 ja que aquesta estructura va plegada i reblonada.



Figura 4.2: Stack



Figura 4.3: Explosionat de la posició de les cel·les a la bateria de CAT09e

En la imatge anterior roman palesat el muntatge mecànic de les cel·les dins de la caixa de bateries.

4.1.2. Les cel·les

Les bateries utilitzades en el *CAT09e* són electroquímiques de la tipologia liti-polímer, la qual era la mateixa que es va emprar en el seu predecessor el prototip *CAT08e*. Estan formades per cel·les del model SLPBA843126 del fabricant *Melasta* [8]. Les característiques tècniques d'aquest model són les següents:

Model	SLPBA643126	
Capacitat nominal	6,35 Ah	
Voltatge nominal	3,70 V	
Condicions de càrrega	Corrent nominal màxim	12,70 A
	Corrent de pic	25,40 A (< 1 s)
	Voltatge màxim	4,20 V
Condicions de descàrrega	Corrent nominal màxim	95,25 A
	Corrent de pic	127,00 A
	Voltatge mínim	3,00 V
Resistència interna	< 2 mΩ	
Cicles de vida (carregant: 1C; descarregant: 15C)	> 1000 cicles	
Rang de temperatures de treball	Càrrega	0 °C ~ 45 °C
	Descàrrega	-20 °C ~ 60 °C
Dimensions de la cel·la	Gruix (T)	10,5 mm
	Amplada (W)	42,7 mm
	Alçada (L)	127,5 mm

Dimensions dels borns de la cel·la	Distància entre borns	21 mm
	Amplada	15 mm
	Gruix	0.2 mm
	Alçada	25 mm
Pes		131 g
Química		LiCoO ₂

Taula 4.1: Taula d'especificacions de la cel·la escollida per al CAT09e [8]

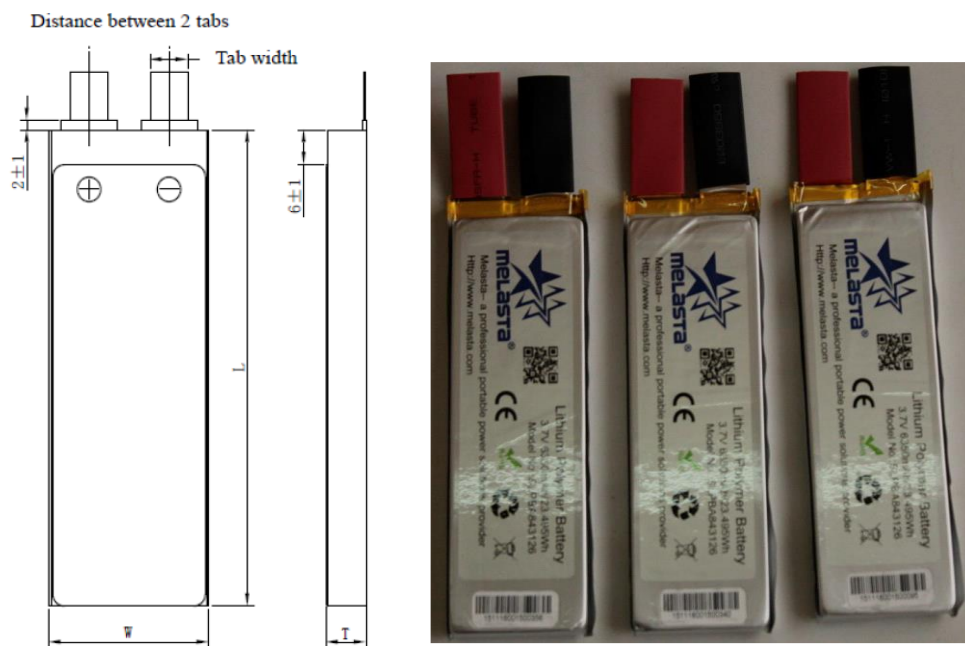


Figura 4.4: Les cel·les i les seves dimensions

4.1.3. Disseny elèctric

4.1.3.1. Configuració elèctrica

El dimensionament elèctric de la bateria consisteix en una combinació d'agrupacions sèrie i paral·lel, per tal d'obtenir la tensió i l'energia requerida.

El nivell de tensió que ha de presentar la bateria ve directament determinat per la tensió d'entrada de l'inversor. En el CAT09e l'inversor utilitzat és el model BAMOCAR D3 400-400 RS de la marca *Unitek* el qual presenta les següents especificacions:

Màxima tensió d'entrada	400 V
Tensió de sortida	780 V
Corrent constant (RMS)	200 A
Corrent de pic	400 A

Taula 4.2: Principals especificacions de l'inversor [9]



Figura 4.5: Inversor Unitek BAMOCAR D3 400-400 RS

Els passos per a la realització del càlcul òptim de la distribució de la bateria van estar els següents:

1. Sabent la tensió màxima de la bateria, 400V, queda determinat el nombre de cel·les en sèrie connectades.

$$N_{series} = \frac{U_{inversor}}{U_{màx_Cel\cdot la}} = \frac{400.0}{4.2} = 95.24 \sim 95 \text{ series} \quad (\text{Equació 4.1})$$

2. Per determinar el nombre de cel·les en paral·lel, és vital conèixer l'energia necessària per completar la prova de l'*Endurance*. Aquest valor es va estimar amb l'ajuda d'una planta feta amb *Simulink*, per un dels membres de l'equip, Víctor Calvo Serra, el qual va dedicar el seu treball de final de grau [3]

Amb les simulacions realitzades es troba que l'energia necessària és 6,6 kWh.

Amb aquesta dada, es pot determinar del tot la configuració elèctrica de la bateria:

$$E = U \cdot C \rightarrow 6600 \text{ Wh} = 6600 \text{ VAh} \quad (\text{Equació 4.2})$$

Prenent com a voltatge el nominal de la bateria, a partir de l'equació 4.3, l'única incògnita restant és la capacitat total de la bateria:

$$C_{bat} = \frac{E_{Endurance}}{U_{nom_bateria}} = \frac{E_{Endurance}}{N_{series} \cdot U_{nom_Cel\cdot la}} = \frac{6600}{95 \cdot 3.7} = 18.78 \text{ Ah} \quad (\text{Equació 4.3})$$

$$N_{paral\cdot lel} = \frac{C_{bateria}}{C_{cel\cdot la}} = \frac{18.78}{6.35} = 2.96 \sim 3 \text{ paral\cdot lel} \quad (\text{Equació 4.4})$$

3. Un cop se sap quants paral·lels s'han imposat per model, es calcula l'energia que generaria aquesta distribució de cel·les i el seu pes.

Configuració elèctrica	95s3p	Capacitat	19,05 Ah
Voltatge màxim	399,00 V	Corrent de càrrega constant	38,10 A
Voltatge nominal	351,50 V	Corrent de descàrrega constant	285,75 A
Voltatge mínim	285,00 V	Corrent de descàrrega de pic	381,00 A
Nombre de cel·les	285 unitats	Energia	6696,07 Wh

Taula 4.3: Especificacions de la bateria de CAT09e

4. Finalment l'últim tema a tenir en compte alhora d'establir la configuració elèctrica de la bateria és la normativa [1]. Segons l'article EV3.3.3 cada *stack* no pot superar els 120 V ni els 6 MJ d'energia.

EV3.3.3 Maintenance plugs, additional contactors or similar measures have to be taken to allow electrical separation of the internal cell segments such that the separated cell segments contain a maximum static voltage of less than 120VDC and a maximum energy of 6MJ. The separation must affect both poles of the segment.

Figura 4.6: Article EV3.3.3 de la normativa FSAE 2017-2018

Per tant, l'interior de la bateria queda dividit en 5 *stacks*:

Configuració elèctrica	19s3p
Voltatge màxim	79,80 V
Voltatge nominal	70,30 V
Voltatge mínim	57,00 V
Energia	1339,21 Wh (4,82 MJ)
Nombre de cel·les	57 unitats

Taula 4.4: Especificacions d'un *stack*

4.1.3.2. Camí de corrent

Dins dels *stacks* és on es realitza la connexió de potència. En la següent figura es mostra un esquema del camí de corrent. En blau s'indica la connexió entre les cel·les. En groc, la connexió entre *stacks*, el que la normativa [1], en l'article EV3.3.3, (figura 4.6), anomena *Maintenance plugs* i que s'expliquen amb més detall en l'apartat 4.1.6.1. Finalment en vermell i negre, els terminals de la bateria, punts per on es connectava tota la bateria a la resta del sistema.

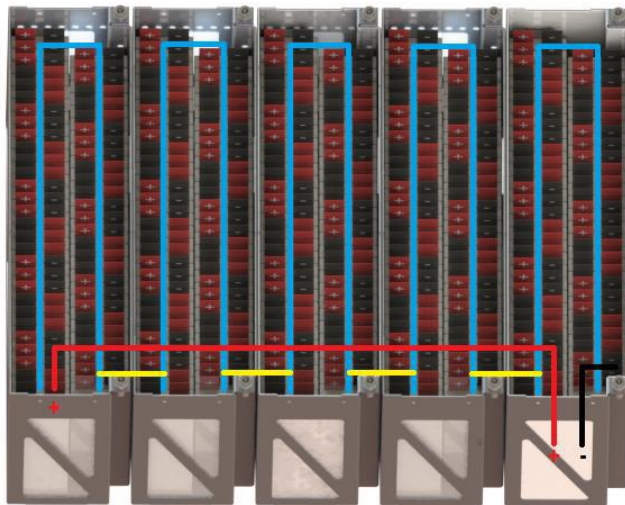


Figura 4.7: Esquema del camí de corrent

4.1.3.3. Bus-bars

Per a la bateria del CAT09e es va decidir el coure com a material per a realitzar el connexionat de potència. Material amb alta disponibilitat, cost assequible i facilitat de mecanitzar amb tall làser.

Com a diferència rellevant amb anys anteriors, es va plantejar comprovar l'efecte de l'oxidació en la superfície del coure sobre la connexió de potència.

Així doncs es va establir un programa de proves realitzat amb 4 mostres diferents:

- Coure polit sense presència d'oxidació i sense tractament superficial.
- Coure amb clars signes d'oxidació i sense tractament superficial.
- Coure amb tractament superficial de níquel de 0,010mm d'espessor.

- Coure amb tractament superficial de níquel 0,005mm i or 0,001mm de gruix.

El resultat que es va obtenir va ser que el tractament superficial de níquel era sensiblement millor que el d'or. Per aquest motiu aquest va ser el que es va decidir aplicar a les bus-bars que formarien part del connexionat de potència de la bateria del CAT09e.

4.1.4. **Battery Management System (BMS)**

El BMS que s'utilitza tant en la bateria del CAT09e com en la del CAT10e és el mateix i el balanceig és de tipus passiu, el qual es basa en consumir energia de les cel·les més carregades mitjançant una resistència.

Com aquest fet genera calor i un dels grans objectius de CAT09e era millorar la refrigeració de la bateria es va decidir col·locar el BMS damunt de les tapes dels *stacks*. D'aquesta manera es va donar més espai per on podia circular l'aire i conseqüentment millorar la refrigeració.

En les tapes dels *stacks* s'hi van incorporar uns espaiadors on subjectar les plaques. La fabricació d'aquestes tapes es va fer mitjançant sinteritzat làser de poliamida, així els espaiadors per el BMS i els suports de les connexions entre *stacks* (*Maintenance plugs*) es van poder integrar en la mateixa peça.

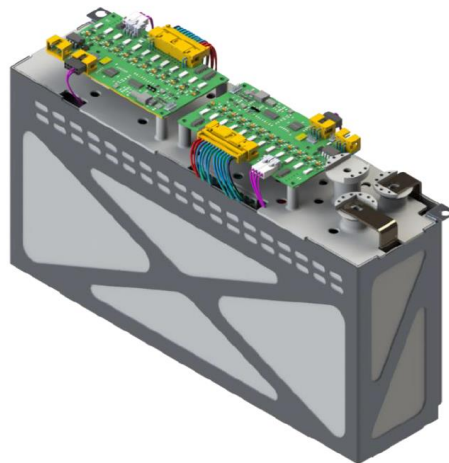


Figura 4.8: Situació del BMS en un stack

Per altra banda, la normativa [1] especifica en l'article EV3.6.4 que tots els cables de sensat de voltatge han d'estar protegits per un fusible. Al no incorporar aquest sistema de seguretat es va optar per a realitzar una nova placa on ubicar els fusibles, situada en el mateix connector de sensat de tensió.



Figura 4.9: Placa de fusibles



Figura 4.10: Connexió de la placa de fusibles al BMS

4.1.5. Connexionat dels stacks

En aquest apartat s'explica com es va dur a terme la connexió de potència de les cel·les i com s'hi va implementar el BMS.

4.1.5.1. Disseny 1

Començant des de la part inferior d'un stack, primerament hi trobem les cel·les, seguides d'una primera peça, anomenada xapa inferior. Aquesta té com a principal funció guiar els bors de les cel·les a través de les ranures, proporcionar una superfície sobre la qual doblegar els borns i allotjar-hi part de la subjecció de tot el sistema de connexió. És una sola peça massissa amb allotjaments per encabir-hi les femelles tal com es pot veure en la figura 4.11.

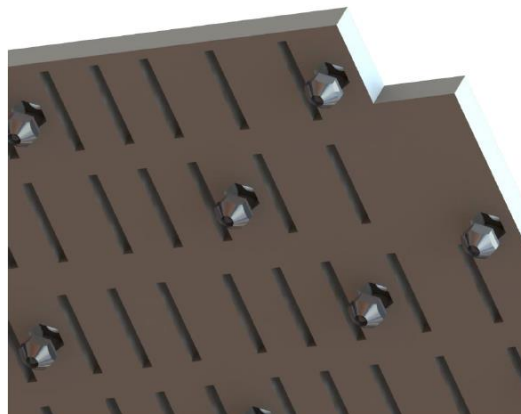


Figura 4.11: Encaix de les femelles en la xapa inferior

Damunt una segona xapa, anomenada xapa superior, la qual hi allotja les bus-bars en la posició pertinent. Aquesta també era d'una sola peça i a més a més s'hi van incorporar elements per guiar el cablejat de sensat del BMS i orificis per a millorar la refrigeració.

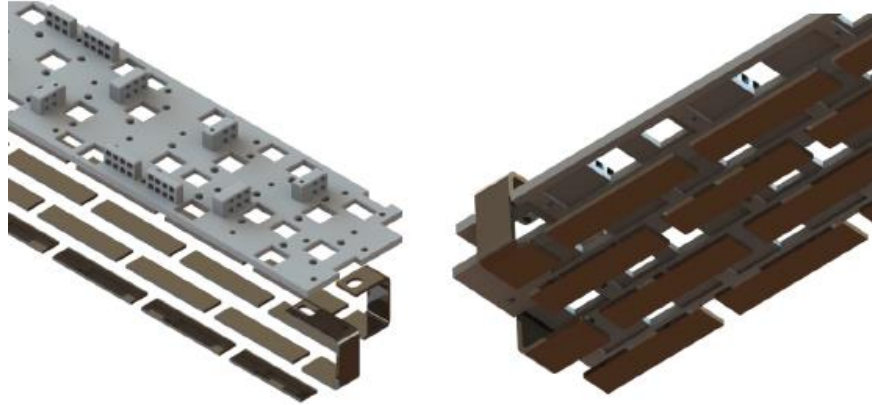


Figura 4.12: Xapa superior

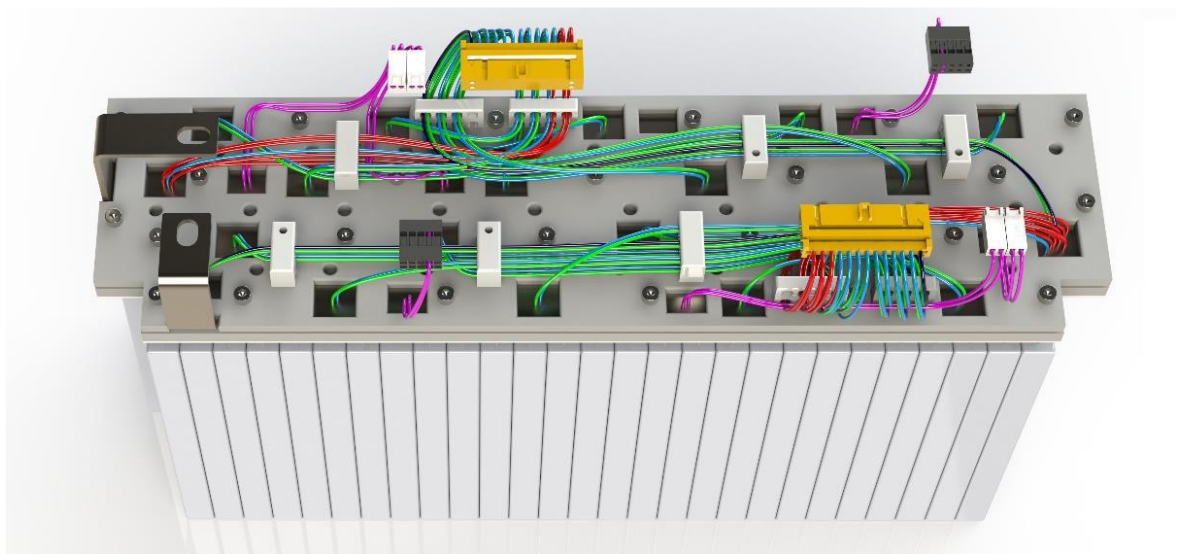


Figura 4.13: Distribució del cablejat en un stack

4.1.5.2. Disseny 2

Després de fabricar i muntar la bateria del CAT09e, es va iniciar una etapa de test en pista, el monoplaça que es va emprar va ser un híbrid entre el CAT08e i el CAT09e, ja que es va utilitzar el xassís del CAT08e sobre el qual se li van muntar algunes millores que incorporaria el CAT09e com ara la bateria, les noves centraletes (*data acquisition* i *dash pannel*) i l'arnés de cablejat.

Gràcies al sistema d'adquisició de dades es va poder controlar l'evolució tant de les tensions com de les temperatures de la bateria al llarg dels diferents dies de proves observant un augment de la caiguda de tensió i conseqüentment un ràpid augment de la temperatura fins al punt que les mesures de seguretat del monoplaça l'aturaven ja fos per sobre temperatura o perquè es detectaven cel·les per sota del seu nivell mínim de tensió.

Analitzant més concretament les dades es va arribar a la conclusió de que el connexionat de potència realitzat fins aleshores no era l'adequat. La resistència del conjunt cel·la més connexió era de $0,036 \Omega$, ordre de magnitud superior del que aporta la pròpia cel·la $0,002 \Omega$ (indicada pel fabricant).

A partir d'aquest moment es va obrir la bateria i es va observar que el sinteritzat de poliamida es trobava lleugerament deformat degut a la temperatura i, a més a més algunes de les femelles de la xapa inferior es trobaven incrustades en el material. Conseqüentment no s'exercia la suficient pressió entre les dues xapes i la connexió era molt dèbil.

Per solucionar aquest inconvenient es van assajar tres mostres:

- Xapa inferior i superior de sinteritzat de poliamida, representant la connexió que duia la bateria fins aquell moment.
- Xapa inferior de baquelita i xapa superior de sinteritzat de poliamida.
- Xapa inferior de baquelita i no hi havia xapa superior. Els cargols travessaven tant les bus-bars com els borns de les cel·les.

Així doncs, amb la informació extreta d'aquestes proves, es va decidir replantejar per complert el connexionat de potència de les cel·les i optar per la unió cargolada entre les bus-bars i les borns de les cel·les ja que va suposar el muntatge amb millors resultats.

En el nou disseny es va substituir la xapa inferior de poliamida per dues xapes de baquelita encolades. Les femelles eren col·locades en la part inferior assegurant la connexió i la part superior proporcionava una base on recolzar les bus-bars. Entre les dues peces que formaven la nova xapa inferior s'hi van afegir volanderes amb la finalitat de repartir millor els esforços i prevenir que les femelles s'incrustessin en la baquelita, tal i com havia passat en el disseny anterior.

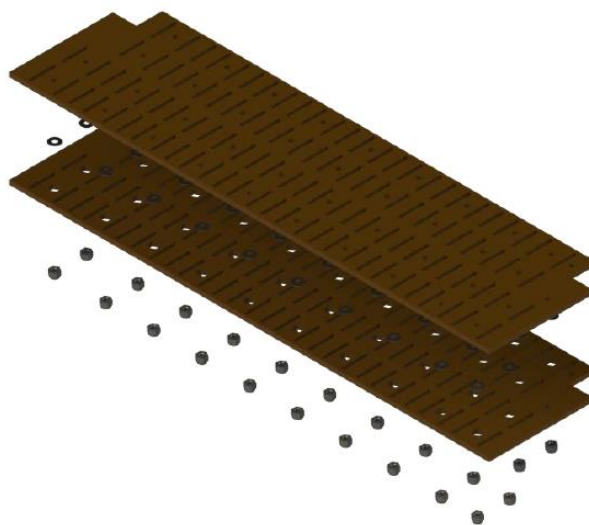


Figura 4.14: Muntatge de la nova xapa inferior

Un nou disseny de bus-bars i una nova distribució de cargols garantien la connexió entre les cel·les. A més a més, es va poder aprofitar el cablejat de sensat del BMS, patint una breu modificació: la incorporació de terminals per tal d'aprofitar la unió cargolada com a punt de sensat.

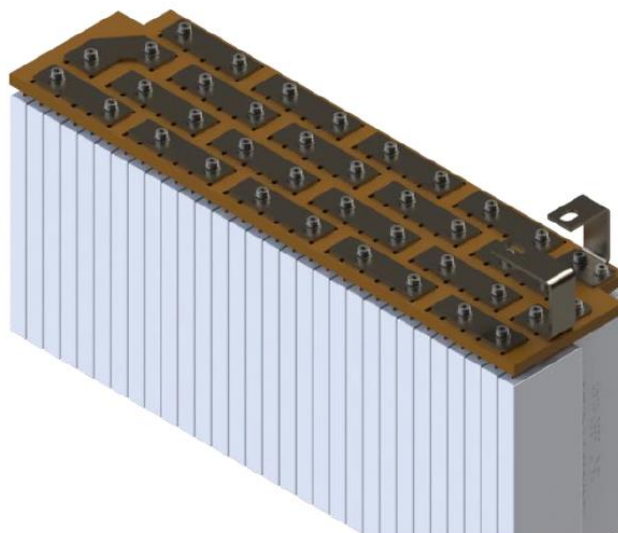


Figura 4.15: Nou connexionat de potència

4.1.6. Muntatge de la bateria

En els apartats anteriors s'ha fet menció a un stack, no obstant, la bateria estava formada per cinc d'aquests stacks, els quals s'havien de connectar entre si per tal de tenir tota l'energia disponible. A més a més també s'havien de connectar totes les plaques de BMS al bus de comunicació per tenir tot el sistema funcionant.

Així doncs, en aquest apartat es parla del muntatge de la bateria, de les connexions entre stacks i amb la resta d'elements que formen part d'aquesta.

4.1.6.1. Connexió entre stacks. *Maintenance plugs*

Els *stacks* es munten dins la caixa de bateries un al costat de l'altre en un compartiment separat de la resta d'elements que es troben també dins la caixa.

Per fer la connexió entre ells, primer de tot s'ha d'introduir el concepte de *Maintenance plug*.

Segons la normativa [1] (article EV 3.4.3) els *Maintenance plug* són totes aquelles connexions destinades a separar elèctricament les cel·les en *stacks* que continguin com a màxim 6MJ d'energia i presentin un voltatge menor a 120V.

A més a més, a continuació d'aquest mateix article, la normativa estableix que aquestes connexions no han de requerir eines per posar-les o treure-les, han d'incloure *positive locking* (autoblocatge) i la superfície de la connexió ha de ser aïllant i no permetre cap connexió elèctrica.

Amb tots aquests requeriments la connexió entre stacks dissenyada es presenta a continuació.

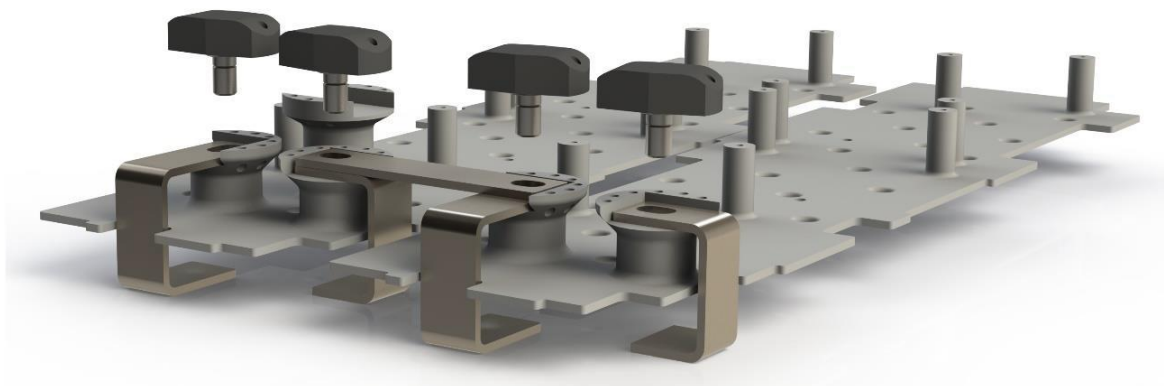


Figura 4.16: Connexió dels *Maintenance plug* entre dos tapes dels stacks

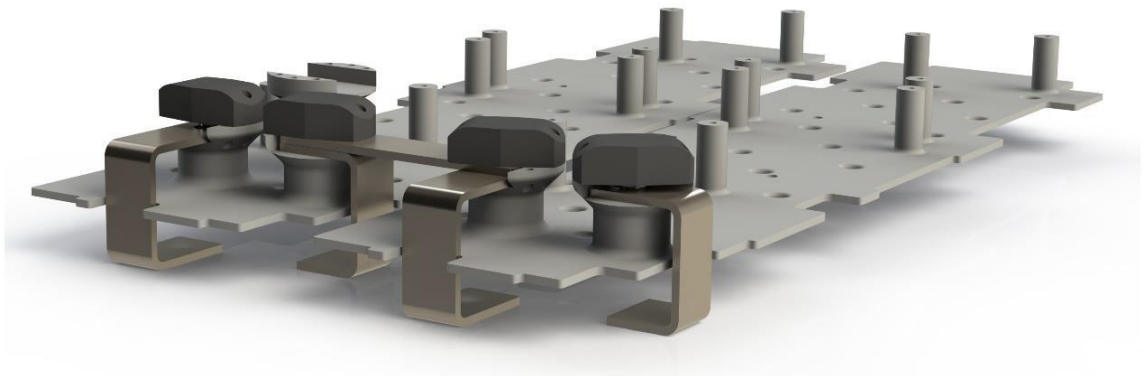


Figura 4.17: Maintenance plug cargolats entre dos tapes dels stacks

Utilitzant el sistema de *Rapid Prototyping* i la poliamida com a material és possible crear una tapa amb uns cilindres que contenen un helicoil. En aquests s'hi rosca un cargol de mètric 6 de cap hexagonal (DIN933) recobert per un protector d'ABS construït amb impressió 3D. Aquest material suporta temperatures elevades, fins a un màxim de 105°C. Les busbars de coure, per tant, resten sobre de cada cilindre permetent posteriorment la connexió entre cada stack.

D'aquesta manera el que s'aconseguia era per una banda aïllar elèctricament la connexió i fer possible rosca i desenroscar el cargol sense la necessitat d'eines

Finalment, per tal de garantir el *positive locking* per a les connexions, el disseny tan del suport com del protector estaven fets de tal manera que es podia col·locar un passador de tipus R que proporcionava l'autoblocatge a la unió.

Comentar també, que tot i que en les figures 4.16 i 4.17 apareixen les bus-bars soles, en el muntatge real tant les que fan la unió entre *stacks* com els terminals de cadascun, es van aïllar emprant tub termoretràctil.

4.1.6.2. Connexió del BMS

Respecte al BMS el que resta per connectar és el bus de comunicació. Per a aquesta connexió es van utilitzar els connectors recomanats pel fabricant i el cable *AlphaWire*. Comentar que aquest és l'únic component d'aquest sistema que surt de l'*stack*, és per aquest motiu que les tapes presenten talls al lateral.

Pel que fa a l'ordre en el que es connecten les plaques, és indiferent sempre i quan es respectin les posicions de les resistències de final de línia, les quals per defecte es troben en la placa *Master* i en la *FreeSB-PR* [10], per tant aquestes dues plaques van ser connectades al principi i al final del bus respectivament.

En la bateria del CAT09e es va optar per inicial el bus en la màster i seguir la direcció del camí de corrent (de la mateixa manera que a CAT08e). És a dir la *màster* controla les 9 primeres sèries, seguidament de la *slave1* que controla les 10 següents, a continuació la *slave2* amb les següents 9 sèries i així successivament amb totes les *slaves* fins arribar al final on es connectava la *FreeSB-PR*.

És important tenir en compte que el CAN del BMS queda referenciat a alt voltatge ja que s'alimenta directament de la bateria i els components que el generen no són aïllats. Per altra banda aquest mateix bus es connecta a la centraleta del cotxe, referenciada a baix voltatge i amb els components que intervenen en el CAN tampoc estan aïllats. Resulta doncs que a través del CAN s'establí un punt d'unió entre l'alt voltatge de la bateria i el baix voltatge de la resta del cotxe, fet potencialment perillós i que provoca que es dispari l'alarma d'aïllament procedent de l'IMD (element definit en el següent apartat).

Per solucionar aquesta situació, el bus de comunicació passava, abans de sortir de la caixa de bateries, per un repetidor aïllat, CANOP-0812-ds de la marca *B&B ELECTRONICS*, situat dins de la caixa de control.

El full d'especificacions del repetidor es pot consultar a l'annex.

4.1.7. Seguretat i gestió de la bateria. Zona de control.

Per acabar la descripció de la bateria, en aquest apartat es descriuen els elements de control i seguretat instal·lats en la mateixa caixa de bateries, i que s'utilitzen per controlar el funcionament d'aquesta amb la resta d'elements.

Les fitxes d'especificacions dels components descrits a continuació es poden consultar a l'annex.

4.1.7.1. Accumulator Isolation Relays (AIR's) – Relés

El package de bateries conté dos contactors de potència anomenats per la normativa [1] AIR's (Accumulator Isolation Relays). La normativa estableix també que han d'estar situats un a cada pol del pack de bateries:

EV 3.6.1 In every accumulator container at least two AIR must be installed.

EV 3.6.2 The AIRs must open both poles of the accumulator. If the AIRs are open, no tractive system voltage may be present outside of the accumulator container.

Figura 4.18: Articles EV 3.6.1 i EV 3.6.2 de la normativa de FSG2017

Un relé és un commutador elèctric que és accionat per un electroimant que obre o tanca un

o diversos contactes. Aquest component permet controlar circuits elèctrics de voltatge o intensitat molt superiors als d'entrada. A més presenta l'avantatge de que només consumeix electricitat durant els instants en què es produeixen les commutacions.

Per qüestions econòmiques, logístiques i de característiques del component, el relé seleccionat és el *KILOVAC LEV100 Series 900 Vdc Contactor*, de la marca *TE-Connectivity*.

Les característiques més interessants d'aquest relé són tal i com indica el seu datasheet [11]:

Current Rating: Main Contacts Switching	
Continuous (Note 1)	100A
Short Term -- 3 Minutes (Note 2)	200A

Figura 4.19: Característiques del relé de potència

La figura 4.20 mostra un esquema del relé:

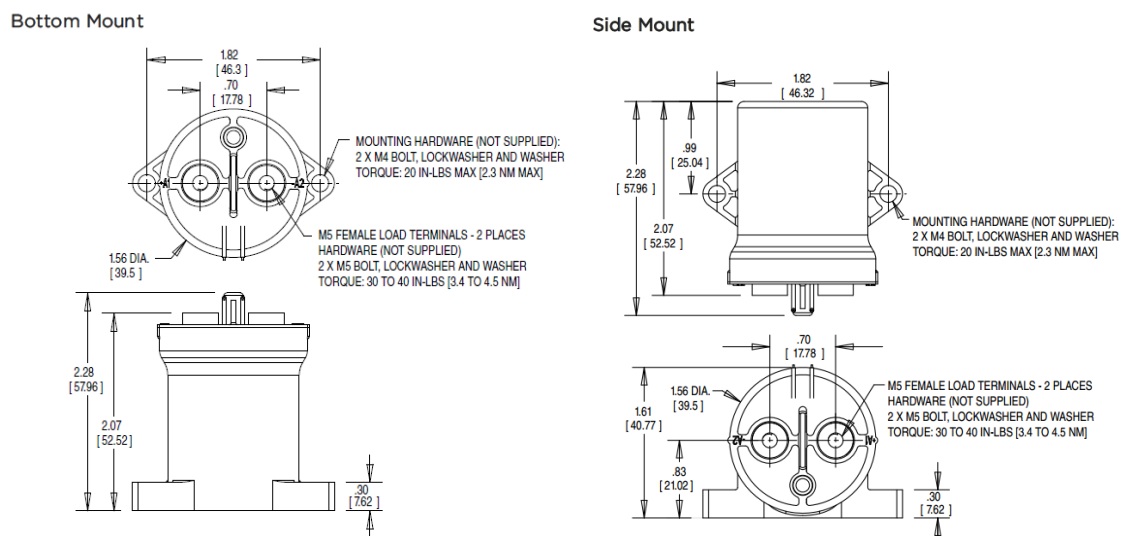


Figura 4.20: Esquema del relé de potència

4.1.7.2. Fusible

El fusible és un element de protecció de la bateria del cotxe. La seva finalitat és la de protegir les cel·les contra els sobre-corrents.

Està format per un conductor que es fon si percep un corrent superior al determinat en el seu dimensionament: el pas de corrent produeix un augment de la temperatura del conductor per efecte joule, i si aquest corrent és més alt de l'especificat, el conductor es fon obrint el circuit.

Quan es procedeix a fer la tria d'un fusible, els aspectes més importants a tenir en compte són el tipus de corrent (AC/DC), el voltatge nominal, les condicions de treball nominals i extremes, la corba I^2T i el corrent de curt-circuit. A partir d'aquestes característiques (especificades a la taula 4.5), el fusible utilitzat per a la bateria del CAT09e és *Cooper-Bussman 160 FEE* [12].

Tipus de fusible	Cooper Bussmann 160 FEE
Corrent continu	160 A
Voltatge màxim	500 VDC
Tipus de fusible	<i>High speed</i>
I^2T	3700 A ² s a 415 VDC
Corrent d'interrupció (màxim corrent al qual el fusible pot interrompre el corrent)	200000 A

Taula 4.5: Característiques principals del fusible

4.1.7.3. Circuit de pre-càrrega i descàrrega

La pre-càrrega és un circuit de condicionament del bus DC. Aquest és necessari per tal de carregar adequadament la bateria de condensadors de l'inversor. Segons la normativa [1] de la competició el circuit ha de veure el 90% del voltatge del bus abans de tancar l'AIR positiu (si el voltatge total de la bateria és de 399V, ha de tancar-se als 359,1V), per aconseguir-ho s'utilitza un relé normalment obert i una resistència per tal de controlar el corrent.

El circuit de descàrrega és necessari per a descarregar la bateria de condensadors de l'inversor. Per a satisfer la normativa [1] que ens diu que ha de suportar el corrent de descàrrega màxim durant 15 segons i el voltatge ha de baixar de 60V en menys de 5 segons, aquest circuit consta d'un relé normalment tancat i una resistència.

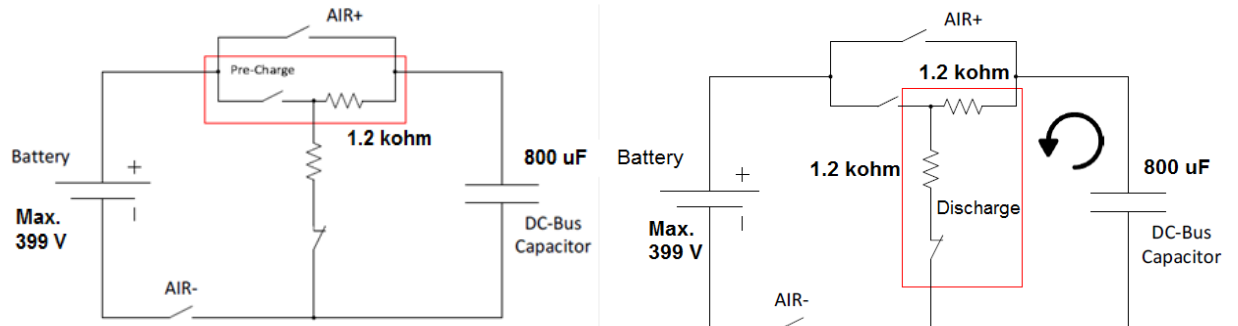


Figura 4.21: Esquemàtic del circuit de pre-càrrega i descàrrega

4.1.7.4. *Insulation Monitoring Device (IMD)*

Un IMD o “dispositiu de control d'aïllament” és una placa de circuit imprès que té com a finalitat monitoritzar la resistència entre un sistema conductor i el terra. El seu objectiu és donar una alerta o desconnectar l'entrada d'energia quan dita resistència sobrepassa un valor donat prèviament.

La funcionalitat d'aquest aparell és garantir l'aïllament elèctric de la bateria d'alt voltatge amb la resta del monoplaça, el qual es troba referenciat al negatiu de la bateria de baix voltatge. Per exigències de la normativa [1] aquest ha de ser comercial i aprovat per usos en automoció, el recomanat i utilitzat en la bateria del CAT09e va ser el IR155-3204 de la marca *Bender* [13]



Figura 4.22: Bender A-ISOMETER IR155-3204

Rang de tensió d'alimentació	10-36 VDC
Tensió d'alimentació	12 VDC
Rang de temperatures de treball	-40..+105°C
Rang d'alt voltatge	DC 0 – 1000V
Ajust del valor de resposta	200k Ω (500 Ω /Volt)
Corrent màxim	150 mA
Temps aproximat de parada al 50% del valor de la resposta	20s

Taula 4.6: Paràmetres de l'IMD

4.1.7.5. *Accumulator indicator*

Consisteix en un LED que s'il·lumina quan en l'altre costat dels AIR's, (costat que queda aïllat quan el contactor es troba obert), hi ha una diferència de potencial superior a 60V.

A la normativa [1] s'especifica el següent:

EV 3.4.9 Each accumulator container must have a prominent indicator, a voltmeter or a red LED visible even in bright sunlight that will illuminate whenever a voltage greater than 60 VDC or half the nominal tractive system voltage, whichever is lower, is present at the vehicle side of the AIRs.

Figura 4.23: Article EV 3.4.9 de la normativa de FSG2017

És per això que dins la caixa de bateries també s'inclou una placa electrònica que controli un LED que s'encendrà o apagarà si el sistema de tracció del cotxe està actiu o apagat respectivament. Aquesta placa també és l'encarregada de gestionar la TSAL (*Tractive Sistem Active Light*). Segons la normativa [1] quan tots dos contactors de potència es troben tancats o el voltatge en el bus DC és major a 60 V una llum ubicada en l'arc de seguretat del vehicle s'ha d'encendre en mode intermitent amb una freqüència d'entre 2 i 5 Hz.

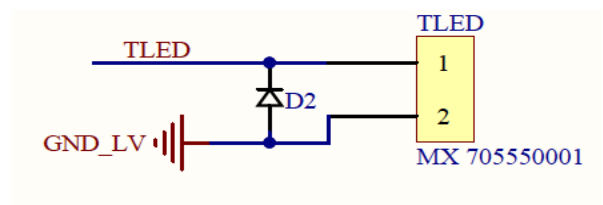
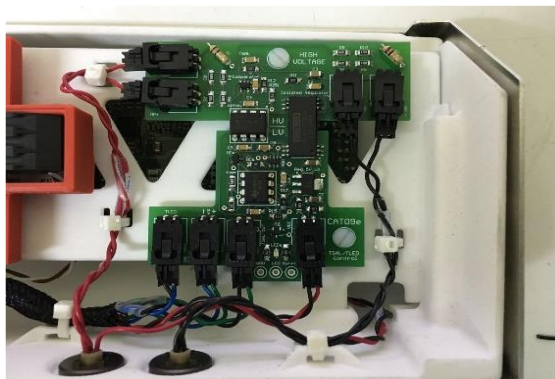


Figura 4.24: Fotografia de la placa LED del CAT09e i esquemàtic de l'indicador LED.

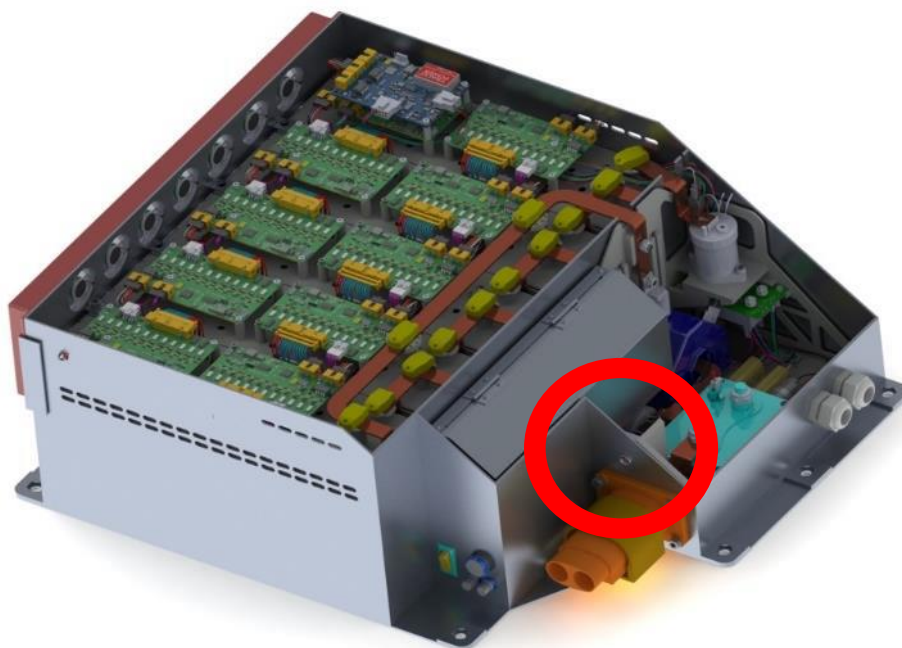


Figura 4.25: Localització de l'indicador LED

4.1.7.6. Sensor de corrent

El sensor de corrent utilitzat en la bateria del CAT09e és el LA 305-S/SP1 de la marca LEM. Aquest sensor és el recomanat per els fabricants del BMS.

Corrent nominal del primari	500 A r.m.s
Corrent nominal del secundari	250 mA
Tensió d'alimentació	12..15 V
Rang de temperatures d'operació	-10 .. + 85 °C

Taula 4.7: Principals característiques del sensor de corrent [14]

4.1.7.7. *Energy Meter*

L'Energy Meter és un dispositiu aportat per l'organització de la competició per tal de mesurar l'energia que s'extreu de la bateria i així determinar la puntuació en la prova de l'*Efficiency*, (apartat 2.1). A més a més s'utilitza per comprovar que l'equip no excedeix dels límits de potència marcats per la normativa [1]. Aquest no necessàriament s'ha de trobar dins de la bateria, però per requeriments de connexionat es va decidir ubicar-lo dins.

Per aquest motiu es va tenir en compte la forma, dimensions i connexionat de l'*Energy Meter* proporcionat pe la competició alhora de dissenyar la caixa. A continuació es presenta un esquema de les dimensions corresponents:

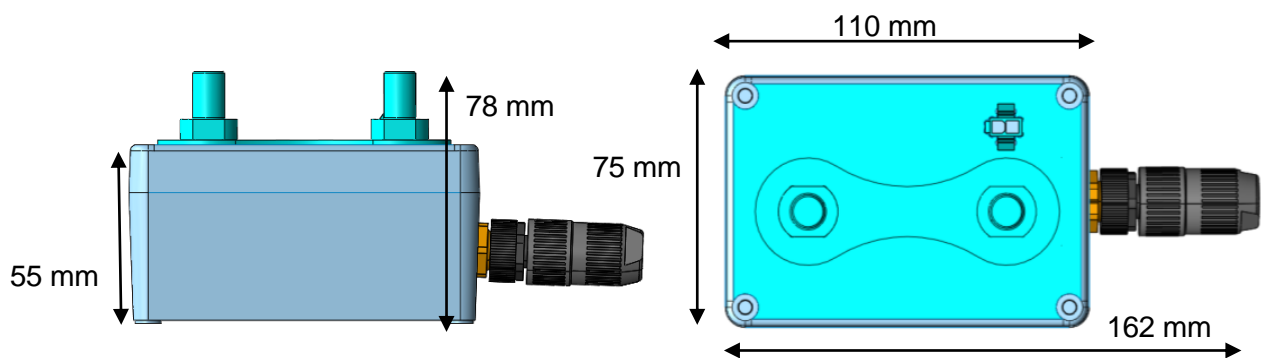


Figura 4.26: Esquema de dimensions de l'Energy Meter de FSGermany

4.1.7.9. *High Voltage Disconnect (HVD)*

El HVD és una desconexió manual del pol negatiu de la bateria d'alt voltatge. Quan es treu la desconexió manual del marc principal, el pol negatiu de corrent s'obre i s'interromp l'energia que va de la bateria a l'inversor.

El marc principal i la desconexió manual de l'HVD són comercials, de l'empresa YAKAZI. L'allotjament d'aquest, que conté el sensor de corrent del BSPD i l'Interlock de l'HVD, ha estat fabricat per l'equip amb poliamida (*DuraForm PA Plastic*). El sensor de corrent és *Honeywell CSLA1DE* i els passa-murs són *Panduit LCB4-14F-L*.

L'HVD pot ser extret fàcil i ràpidament sense retirar cap mena d'objecte. El mecanisme s'acciona amb la mà i té 2 etapes de bloqueig de palanca.

Aquest dispositiu no es troba com a tal dins de la bateria, però la seva funció és interrompre el pas de corrent, obrint el circuit de potencia mitjançant el sistema mecànic descrit anteriorment i instal·lat en el lateral esquerre del vehicle, a una alçada de 425 mm.

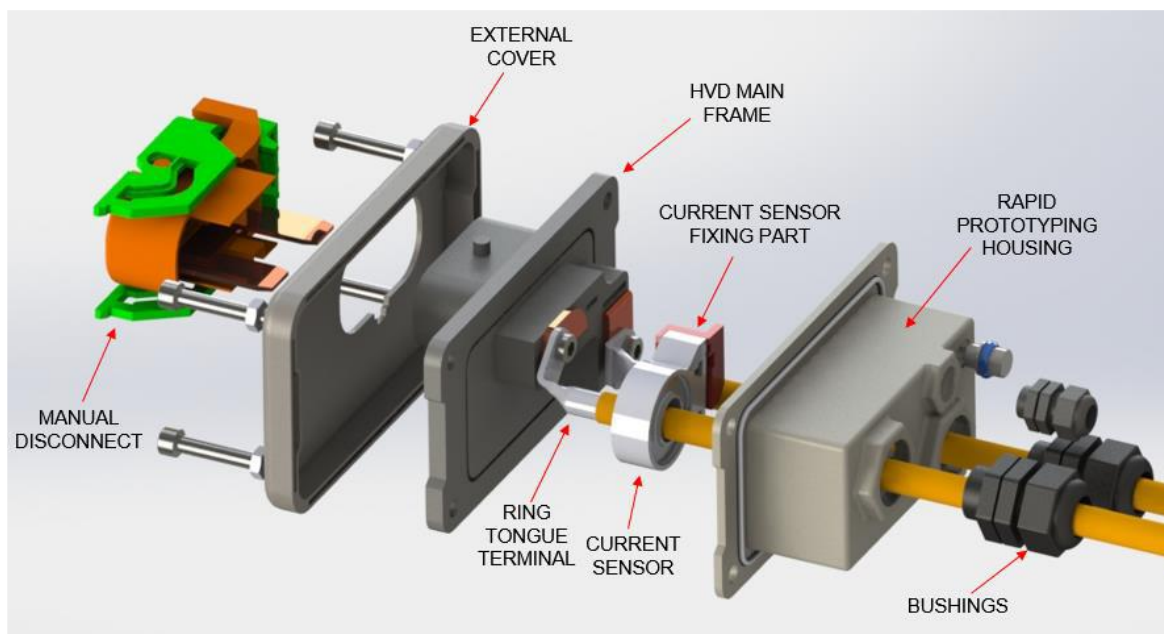


Figura 4.27: Vista explosionada de l'HVD



Figura 4.28: Localització de l'HVD al CAT09e

4.1.7.10. Circuit de control

A continuació es presenta un esquema del connexionat de control:

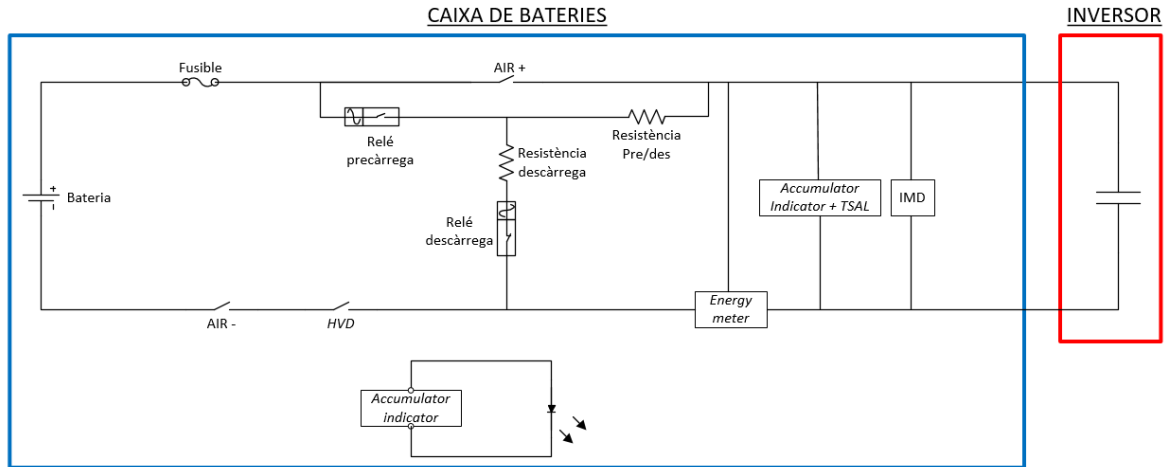


Figura 4.29: Esquema del connexionat de control

Destacar, que el control dels AIR's es trobava a càrrec de la centralita del cotxe. Els contactors tot i poder ser controlats pel BMS, no es va implementar ja que en el procediment de pre-càrrega del bus DC, el tancament dels AIR's s'ha de realitzar en instants determinats, cosa que el BMS no té en compte.

No obstant, tota la informació que recull el BMS era enviada a la centralita, la qual obria els AIRs en cas d'anomalia a la bateria.

4.1.7.11. Muntatge de la zona de control

Per tal de facilitar el muntatge i el posterior manteniment de la zona de control, aprofitant de nou l'oportunitat que aporta el sinteritzat làser de poliamida, l'equip va dissenyar un xassís per aquesta zona. Aquest element proporcionava les subjeccions necessàries per als diferents elements i permetia el muntatge fora de la bateria.

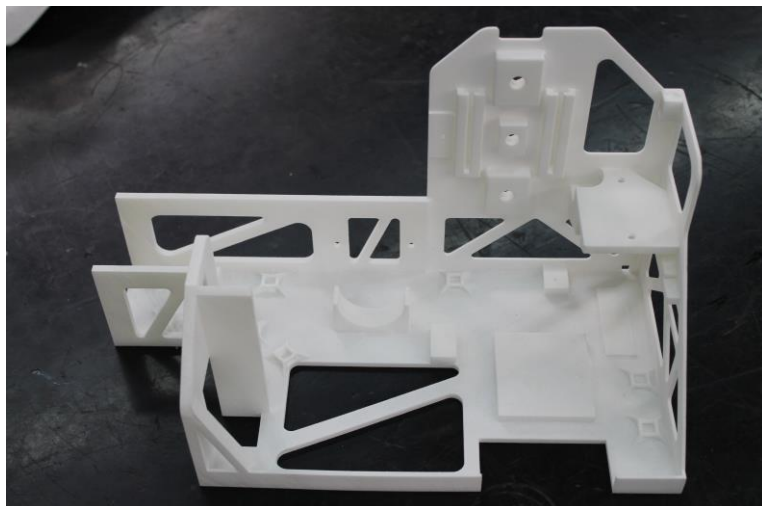


Figura 4.30: Xassís de poliamida

Per motius de seguretat i amb l'experiència de la temporada anterior, també es va dissenyar i construir una tapa per a protegir el fusible de qualsevol possible curt-circuit.

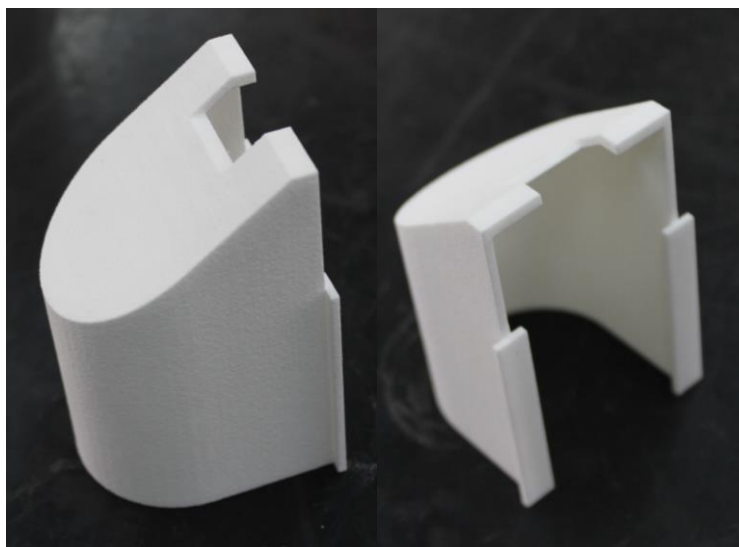


Figura 4.31: Tapa per al fusible

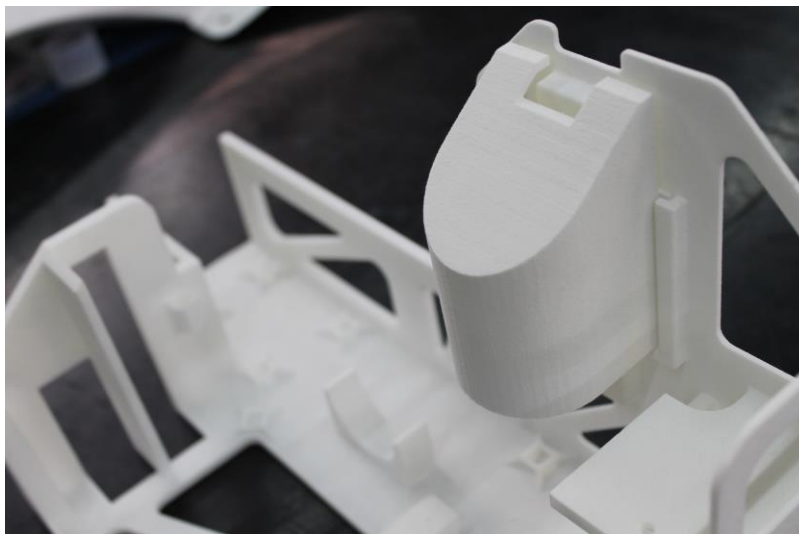


Figura 4.32: Localització de la tapa del fusible

Per acabar es mostren dues imatges de com quedava implementat el circuit de control dins la caixa de bateries.

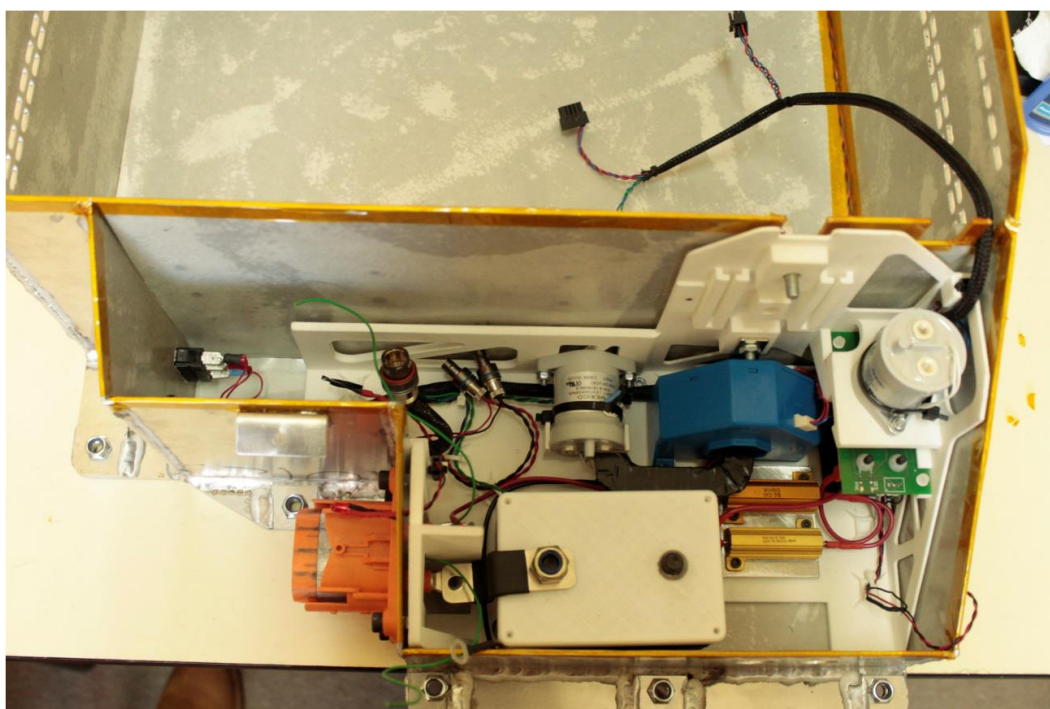


Figura 4.33: Implementació del circuit de control

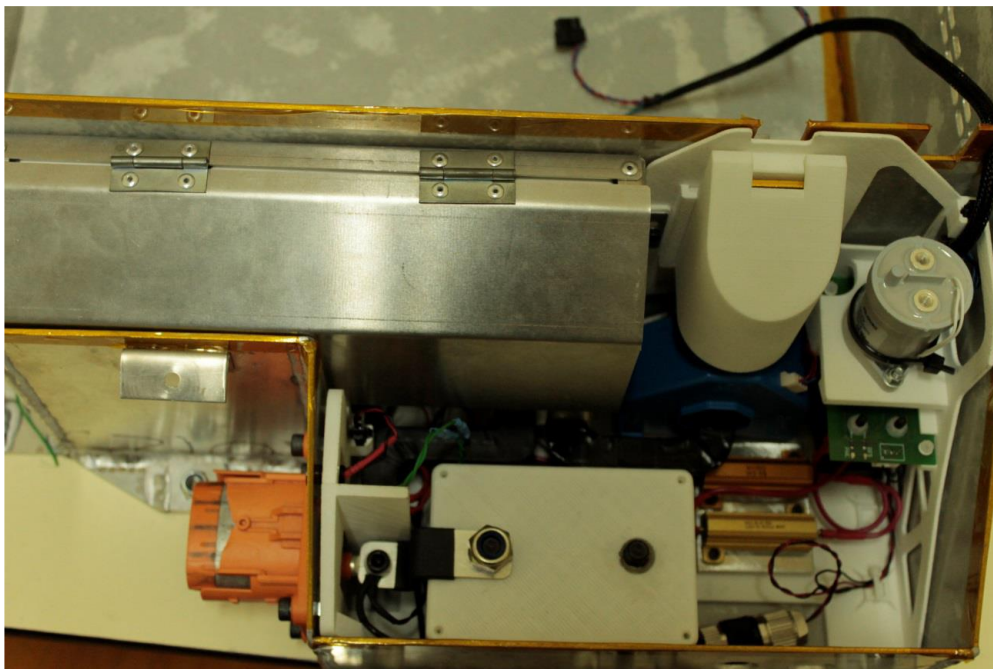


Figura 4.34: Implementació del circuit de control

4.1.8. Refrigeració

En aquest apartat es presenta un breu resum de com es va plantejar la refrigeració de la caixa de bateries del CAT09e.

La refrigeració de la caixa de bateries, des de l'inici, es va plantejar que havia de ser per aire, convecció forçada. Es va descartar la refrigeració líquida degut a la complicació a l'hora d'implementar-la i garantir la impermeabilitat del sistema.

Així doncs el sistema de refrigeració consistia en un xassís de ventiladors ubicats a la part posterior de la caixa, que s'encarregaven d'extreure l'aire de l'interior. A més a més, la caixa presentava uns orificis als laterals per on entrava l'aire i ubicats a l'alçada on es trobaven les connexions de potència, lloc on es genera la major part de la calor. Per facilitar la circulació d'aire per tota la bateria, els stacks també es trobaven foradats a aquesta alçada.

Per altra banda, a més, aquest sistema es va adaptar a una nova necessitat: la refrigeració del BMS. A diferència de CAT08e, les plaques estaven col·locades sobre la tapa de l'stack, així es va aconseguir tenir un canal d'aire només per a aquesta zona.

Finalment comentar que es va decidir potenciar al màxim possible tot el sistema d'extracció d'aire substituint ventiladors de 25x25mm (portats a CAT08e) per ventiladors de 40x40mm capaços d'extreure més cabal d'aire. Es va realitzar, també, un estudi tèrmic i aerodinàmic

per tal d'optimitzar al màxim tot el sistema.

Per més detalls es pot consultar el treball de fi de grau de l'Ian Cusiné [5], on es detalla la refrigeració tant del CAT08e com del CAT09e.

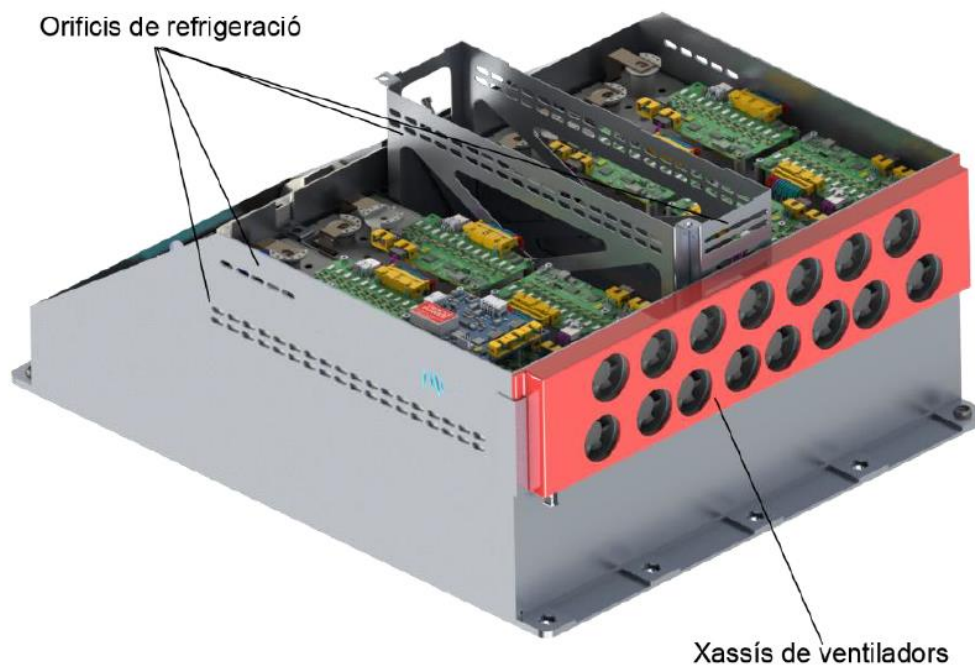


Figura 4.35: Refrigeració de la bateria del CAT09e

4.2. Comentaris i possibles camins de millora

Per acabar amb la bateria del CAT09e, a continuació s'especifiquen un conjunt d'aspectes que després d'utilitzar la bateria al llarg de la temporada i després del període de competicions, s'ha vist que no funcionaven del tot bé i que cal millorar o canviar de cara a augmentar el rendiment o la seguretat, facilitar el muntatge o passar més fàcilment les verificacions tècniques.

El principal aspecte que es va poder confirmar durant les competicions va ser el **dimensionament de l'energia**. L'energia de la bateria del CAT09e no era suficient per a treure el màxim rendiment del monoplaça ja que per a ser capaç d'acabar la prova reina, l'*Endurance*, s'havia de córrer a un ritme bastant baix. Així doncs, un cop entrada la nova temporada, s'han dedicat varies de les primeres jornades de proves per a estudiar quina hauria de ser l'energia per a que el CAT10e pugui realitzar un recorregut de *Endurance* a ritme mitjà-alt.

En la mateixa línia del dimensionament de l'energia, un punt clau de la nova temporada és el **connexionat de potència**. Tot i haver millorat amb la unió cargolada de CAT09e respecte la unió per pressió de CAT08e, les connexions de potència seguien sent el punt més calent de la bateria. Això era conseqüència d'unes pèrdues d'energia degut a la resistència equivalent de la connexió. Per aquest motiu l'equip va fer un pas endavant i va estudiar la possibilitat de realitzar el connexionat de potència mitjançant soldadura elèctrica.

Per altra banda, la **refrigeració** va ser un dels altres factors a tenir en compte, tant la refrigeració del connexionat de potència com la dels cossos de les cel·les. Aquestes al estar en contacte directe les unes amb les altres provoca que hi hagi molt pocs conductes per on pugui passar l'aire i per tant una dificultat alhora de poder refrigerar les de més al centre. A la bateria del CAT10e es planteja una nova disposició de les cel·les per tal de poder millorar aquest problema.

A nivell constructiu, un dels punts a millorar eren els *Maintenance plug* ja que al ser unes peces dissenyades i construïdes per l'equip i formar part del camí de corrent es convertien en part clau de la inspecció de la bateria a cada competició. Per aquest motiu es va decidir que per a la nova temporada aquests serien comercials i així garantir la seguretat.

La localització de l'*Energy meter* va ser també un punt a millorar. Tot i la seva bona connexió elèctrica (per a garantir el seu bon funcionament és recomanable connectar-lo de tal manera que es pugui desconectar fàcilment de la bateria, tant el pol positiu com el negatiu) i estar situat després de l'HVD, la seva localització no era la més òptima. A l'estar dins la bateria i al estar aquesta sellada un cop passades les verificacions, provocava que

sempre que sorgís algun problema amb l'*Energy meter* s'hagués d'obrir la bateria i que posteriorment un inspector la tornés a verificar i segellar. Això provocava una pèrdua de temps que durant competicions pot ser crucial per a la classificació.

Un altre punt a explicar és la importància de l'**Accumulator check**, on es verifiquen al detall i de manera exhaustiva tots els aspectes rellevants de la bateria, principalment els relacionats amb la seguretat. Cal dir que és una verificació que, per ara, només la realitza la competició de *Formula Student Germany* (FSG).

És en l'Accumulator check on s'incorpora l'*iButton*, un sensor de temperatura que aporta l'organització de *Formula Student Germany* per tal de verificar que no se superen els límits de temperatura indicats per la normativa [1].

Aquest dispositiu s'ha d'instal·lar durant la verificació al lloc indicat per l'*Scrutiner* (l'inspector) i serà a l'àrea que es preveu més calenta de la bateria i en contacte directe amb un born negatiu o una bus-bar.

EV 3.7.5 An independent cell temperature monitoring device may be installed by the officials during accumulator inspection, see IN3.

The device must be placed on the warmest negative cell terminal of the accumulator container and in direct contact with the terminal or no less than 30 mm away from it on the busbar.

Figura 4.36: Article EV 3.7.5 de la normativa de FSGermany 2017

Per últim comentar que tant aquests principals canvis com els altres que s'han realitzat per a poder-los adaptar, s'han estudiat tenint en compte molts factors rellevants com poden ser: la funcionalitat, la seguretat, el preu com també el pes de més que suposava en la totalitat del monoplaça, ja que, com s'ha dit anteriorment baixar el pes del cotxe és un dels objectius de l'equip d'aquesta temporada.

5. Milliores introduïdes al CAT10e

Per la nova temporada, 2016/2017, l'objectiu principal de l'equip és seguir amb la rutina de no introduir grans canvis, continuar el desenvolupament del CAT09e. Corregir tots aquells aspectes que no havien funcionat bé, ja fos per falta de temps, falta de proves a pista o per errors de disseny o fabricació.

En aquest apartat s'explicaran amb detall tots els canvis introduïts en la nova bateria, així com els motius pels quals s'han introduït.

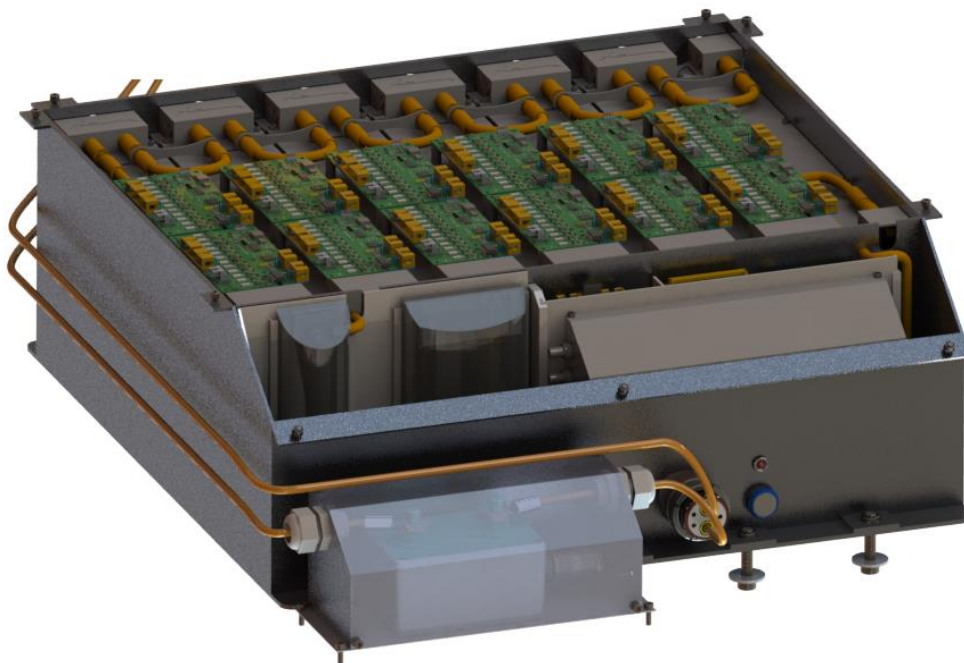


Figura 5.1: Bateria del CAT10e

5.1. Dimensionament de l'energia

Com ja s'ha explicat anteriorment, el dimensionament de l'energia de la bateria és un dels principals aspectes que s'havien de variar aquesta nova temporada ja que amb el CAT09e es feia impossible córrer tota una *Endurance* a un ritme alt.

En aquest apartat s'explicarà l'estudi realitzat durant les jornades de proves en pista, l'anàlisi de dades posterior i finalment els resultats obtinguts.

5.1.1. Pèrdues degudes al *voltage drop*

Per tal de saber quina energia necessita la bateria per tal de que el monoplaça sigui capaç de recórrer la prova de resistència a un bon ritme, primer es necessita saber quanta de l'energia emmagatzemada s'allibera degut a les pèrdues i, per tant, no són útils alhora de fer els càlculs.

A partir dels resultats de les proves realitzades al laboratori de la planta 11 (proves detallades a l'apartat 5.2) s'ha fet un anàlisi de quanta energia es perd degut al *voltage drop*.

Muntatge amb el model de cel·les de CAT09e

Ampers cel·la	Percentatge [%]	Voltatge 3s1p	Voltatge bateria	Voltage drop	Vdrop*Amp	Ponderació
5,7	18,8	4,05	384,75	3,51	59,67	11,22
9,0	18,9	3,99	379,05	8,55	230,85	43,63
19,0	31,3	3,91	371,45	14,95	852,15	266,72
29,0	19,8	3,78	359,1	26,3	2288,1	453,04
49,0	6,3	3,53	335,35	49,15	7225,05	455,18
76,7	5,4	3,38	321,1	62,4	14352	775,00
TOTAL	100,5				25007,82	2004,79

Taula 5.1: Energia perduda degut al *voltage drop*. Cel·les CAT09e

Muntatge amb el model de cel·les de CAT10e

Ampers cel·la	Percentatge [%]	Voltatge 3s1p	Voltatge bateria	Voltage drop	Vdrop*Amp	Ponderació
5,7	18,8	4,08	387,6	1,35	59,67	11,22
9,0	18,9	4,07	386,65	2,3	62,1	11,74
19,0	31,3	4,05	384,75	4,2	239,4	74,93
29,0	19,8	4,03	382,85	6,1	530,7	105,08
49,0	6,3	4	380	8,95	1315,65	82,89
76,7	5,4	3,96	376,2	12,75	2932,5	158,36
TOTAL	100.5				5103,3	437,30

Taula 5.2: Energia perduda degut al voltage drop. Cel·les CAT10e

Aquests resultats, passats a kWh tenim que per al muntatge amb cel·les de CAT09e perdem **0,98 kWh** mentre que per el muntatge amb cel·les de CAT10e en perdem **0,21 kWh**.

Per altra banda es va realitzar el mateix estudi a partir de les dades extretes d'un dia de proves amb el CAT09e.

Proves en pista CAT09e

Ampers	Percentatge	Voltatge	Voltage drop	Vdrop*Amp	Ponderació
5	11.4	384	3	15	1.71
17	7.4	379	8	136	10.064
20	6.4	380	7	140	8.96
27	5.3	377	10	270	14.31
35	7.2	375	12	420	30.24
43	7.3	369	18	774	56.502
50	3.5	372	15	750	26.25
57	3.4	365	22	1254	42.636
65	9.3	361	26	1690	157.17
73	7.8	356	31	2263	176.514
80	7	355	32	2560	179.2
87	4.3	352	35	3045	130.935
95	2.8	350	37	3515	98.42
103	3.3	347	40	4120	135.96
110	2.4	342	45	4950	118.8
117	1.9	336	51	5967	113.373
125	1.1	335	52	6500	71.5
133	0.7	332	55	7315	51.205
140	0.5	327	60	8400	42
147	0.5	323	64	9408	47.04
155	0.8	323	64	9920	79.36
163	0.2	317	70	11410	22.82
170	0.4	317	70	11900	47.6
177	0.2	317	70	12390	24.78
185	0.4	308	79	14615	58.46
193	0.6	308	79	15247	91.482
200	1.5	302	85	17000	255
207	1.4	293	94	19458	272.412
215	0.8	289	98	21070	168.56
223	0.4	291	96	21408	85.632
230	0.3	286	101	23230	69.69
TOTAL	100.5			241140	2688.585

Taula 5.3: Energia perduda degut al voltage drop en el CAT09e

Així doncs, si realitzem el mateix càlcul que abans tenim que, per al CAT09e l'energia que es perd degut al *voltage drop* és de **1,32 kWh**.

A partir d'aquestes dades realitzem una regla de tres per a calcular quina seria l'energia perduda en el CAT10e degut al *voltage drop* i ens resulta uns 0,283 kWh. Si li apliquem un coeficient de seguretat de 1,5 tenim finalment que l'energia perduda al CAT10e seria de **0,424 kWh**.

5.1.2. Proves en pista

A principi de la temporada 2016-2017 l'equip va dedicar un seguit de proves en pista per tal de poder estudiar de la manera més real possible quina energia necessita el monoplaça per a realitzar una *Endurance* a un ritme mitjà-alt.

Aquesta prova consistia en portar el CAT09e al límit, corrent a un ritme d'*Autocross*, en un circuit el més semblant possible al de les competicions. El principal problema que sorgia durant l'estudi era la temperatura. Com ja s'ha dit anteriorment la bateria del CAT09e no era capaç d'aguantar una *Endurance* a ritme alt ja que s'escalfava molt ràpidament i arribava a temperatures de més de 60 graus en pocs minuts. Per aquest motiu el que s'havia de fer era el màxim de voltes possibles a ritme alt i quan la bateria es sobreescalfava, es parava per a poder refredar-la.

Aquest estudi va durar tota una jornada i es van realitzar 18 proves en total, unes a ritme de *Endurance* i unes altres a ritme d'*Autocross*.

	Ritme	Voltes	Motiu de la parada
Prova 1	Endurance	2	Temperatura del Bus
Prova 2	Autocross	4	Temperatura del Bus
Prova 3	Autocross	2	Temperatura del Bus
Prova 4	Autocross	1	Inverter failure
Prova 5	Autocross	1	Inverter failure
Prova 6	Autocross	2	Temperatura del Bus
Prova 7	Autocross	2	Temperatura del Bus
Prova 8	Autocross	2	Temperatura del Bus
Prova 9	Autocross	2	Temperatura del Bus
Prova 10	Endurance	9	Temperatura del Tab
Prova 11	Endurance	5	Temperatura Cel·la

Prova 12	Endurance	2	Temperatura del Tab
Prova 13	Endurance + Autocross	21+1	Temperatura del Tab
Prova 14	Autocross	1	Temperatura del Tab
Prova 15	Autocross	1	Temperatura del Tab
Prova 16	Endurance	6.5	Temperatura del Tab
Prova17	Autocross	1	Temperatura del Tab
Prova 18	Autocross	1.5	Temperatura del Tab

Taula 5.4: Proves realitzades el 26-09-2016 a Montmeló

Com es pot observar a la taula anterior el principal motiu de les parades va ser la temperatura, ja sigui del Bus, del cos de la cel·la o del tab de la cel·la. També cal remarcar la diferència que hi havia entre el número de voltes realitzades als diferents ritmes: a ritme d'*Autocross* (alt) es van poder realitzar com a màxim dues voltes (tret de la prova 2 que se'n van poder realitzar 4) mentre que a un ritme més baix, ritme d'*Endurance* es van realitzar 2, 5, 6.5, 9 i 21 depenent de la prova.

5.1.3. Energia útil i teòrica

A partir dels resultats de les proves en pista de l'apartat anterior, es calcula quanta energia útil s'ha utilitzat per a realitzar la prova d' *Autocross*. Cal dir que s'ha calculat amb algunes de les 18 proves, la mitjana de les quals ha donat **7,26 kWh**.

Segons l'anàlisi de les dades extretes del dia de proves, gràcies al programa DataAnalysisPro s'ha observat que l'energia útil que extreu la bateria del CAT09e és de **5,57 kWh**.

Així doncs podem calcular quina és, a partir de l'energia útil de CAT10e, l'energia teòrica que es necessita a la bateria per tal de satisfer l'objectiu plantejat anteriorment.

- Energia útil CAT09e: 5,57 kWh + 1,32 kWh = 6,89 kWh
- Energia útil CAT10e: 7,26 kWh + 0,424 kWh = 7,684 kWh

Energia [kWh]	Teòrica	Útil+Calor
CAT09e	6,67	6,89
CAT10e	7,44	7,684

Taula 5.5: Energia útil i teòrica de CAT09e i CAT10e

Podem concloure, per tant, que l'energia que necessitem a la bateria de la nova temporada és de **7,44 kWh**.

5.1.4. Les cel·les i configuració elèctrica

En primer lloc, per tal d'escollir la cel·la correcta i poder comparar diferents configuracions amb la que es portava a CAT09e, es va fer un excel on es pot trobar una base de dades de totes les cel·les que posseeix l'empresa Melasta [15].

En aquest excel s'han de marcar els objectius que es volen assolir a CAT10e, a cada columna hi ha un filtre que ens permet restringir les cel·les amb les característiques que es volen. Seguidament es marca la configuració en sèrie i paral·lel que es desitja per a la caixa de bateries de la nova temporada i posteriorment realitza una recerca automàtica de les millors cel·les possibles amb la configuració i els paràmetres desitjats.

				Volum cel.les CAT09e (mm ³)		16291918.13		Pes cel.les CAT09e (g)		37335			
				canvia aquí→ 95 serie 3 paral·lel									
Item No.	Cell Model No.	Thickness (mm)	Rate C	Serie	Paral·lel	Ampers (A)	E (kWh)	Volum (cm ³)	%Vol	Pes (kg)	%Pes		
391	SLPBA942126	10.5±0.3	15	95	3	283.5	6.6434	15201.9000	-7%	36.765	-2%		
392	SLPBB042126	10.5±0.3	15	95	3	283.5	6.6434	15201.9000	-7%	35.91	-4%		
393	SLPB9845119	9.4±0.2	8	95	3	151.2	6.6434	14466.6000	-11%	33.915	-9%		
394	SLPBA047115	9.8±0.2	8	95	3	151.2	6.6434	15096.1650	-7%	33.63	-10%		
395	SLPBA842126	10.6±0.2	15	95	3	283.5	6.6434	15201.9000	-7%	36.195	-3%		
396	SLPB9345123	9.1±0.2	8	95	3	151.2	6.6434	14632.5270	-10%	33.63	-10%		

Figura 5.2: Base de dades cel·les Melasta

Calculant el volum i el pes de les cel·les escollides, les compara amb el volum i el pes de les cel·les de CAT09e i indica quin és l'increment en tant per cent.

Amb l'ajuda d'aquest excel l'equip va realitzar una altra base de dades per a estudiar quines eren les millors cel·les per a les configuracions des de 95s3p fins a 108s3p. En aquesta hi trobem, a part de les mides de cada cel·la, les característiques principals que tindria la bateria per a cada configuració: voltatge màxim, voltatge nominal, voltatge de càrrega, energia teòrica, energia útil, pes i una ponderació del 0 a l'1 realitzada automàticament pel programa que ens permet analitzar de manera més visual les diferents

opcions.

CAT09e	95	399	351,5	4,2	334	459	6696,075	1	6696,075	37,05	
Series	Nº Cel·la	Voltatge Màxim [V]	Voltatge Nominal [V]	Voltatge Càrrega [V]	Longitud [mm]	Amplitud [mm]	Energia Teòrica [W·h]	%Energia	Energia Útil [W·h]	Pes [kg]	Ponderació
95	411	399	351,5	4,2	58	7,5	7381,5	1	7381,5	42,46	0,81
95	426	399	351,5	4,2	63	8,4	7908,75	1	7908,75	43,61	0,82
96	407	403,2	355,2	4,2	42	10,4	7032,96	1	7032,96	37,15	0,83
96	411	403,2	355,2	4,2	58	7,5	7459,2	1	7459,2	42,9	0,81
97	407	407,4	358,9	4,2	42	10,4	7106,22	1	7106,22	37,54	0,83
97	411	407,4	358,9	4,2	58	7,5	7536,9	1	7536,9	43,36	0,82
98	407	411,6	362,6	4,2	42	10,4	7179,48	1	7179,48	37,9	0,84
98	411	411,6	362,6	4,2	58	7,5	7614,6	1	7614,6	43,8	0,82
99	407	415,8	366,3	4,2	42	10,4	7252,74	1	7252,74	38,31	0,84
99	411	415,8	366,3	4,2	58	7,5	7692,3	1	7692,3	44,25	0,82
100	407	420	370	4,2	42	10,4	7326	1	7326	38,7	0,85
101	392	424,2	373,7	4,2	42	10,5	7062,93	1	7062,93	38,2	0,84
101	407	424,2	373,7	4,2	42	10,4	7399,26	1	7399,26	39,1	0,85

Figura 5.3: Comparació de les diferents configuracions elèctriques

Un cop analitzades totes les cel·les i configuracions possibles tenint com a objectius mantenir la longitud de la caixa i augmentar l'energia i el voltatge, es van escollir les cel·les següents: 389, 392, 407, 411, 426.

Número de cel·la	389	392	407	411	426
Capacitat (mA·h)	6100	6300	6600	7000	7500
Resistència interna	< 3,0	< 2,0	< 1,5	< 2,0	< 2,0
Llargada (mm)	135,50	127,50	127,00	127,50	126,00
Alçada (mm)	45,00	42,00	42,00	42,00	63,00
Gruix (mm)	9,00	10,50	10,40	10,40	8,40
Pes (g)	125,00	126,00	129,00	149,00	153,00

Taula 5.6: Principals característiques de les cel·les 389, 392, 407, 411 i 426

Tenint en compte totes les configuracions d'aquestes cel·les les dues opcions més òptimes eren amb la cel·la 407.

5.1.4.1. 104s3p

Aquesta opció suposa una reducció en longitud de 22 mm, un augment d'amplada de 133 mm i un increment en pes de 3,71 kg. Pel que fa als aspectes elèctrics, aquesta configuració permet assolir 436,8 V de voltatge màxim i una energia de 7,6 kW·h.

Així doncs, els beneficis d'aquesta solució són:

- **Augment de l'energia** per tal d'assolir l'energia desitjada calculada durant les proves fetes el 25 de setembre.
- **Augment del voltatge** per tal d'evitar els problemes de saturació de l'inversor.
- **Disminució de la batalla del vehicle** reduint la longitud total del pack.

Com a contrapartida:

- Hi ha un **augment de pes** de 3,71kg.
- **Augment de l'amplada** del pack degut a la major quantitat de *stacks* a la caixa.
- **Stacks no regulars** degut a la configuració i als *stacks* utilitzats.

5.1.4.2. 105s3p

La segona opció escollida suposa una reducció en longitud de 22 mm, un augment de l'amplada de 98 mm i un increment en pes de 3,92 kg. Pel que fa als aspectes elèctrics, aquesta configuració permet assolir 441 V de voltatge màxim i una energia de 7,7 kW·h.

Així doncs, els beneficis d'aquesta solució són:

- **Augment de l'energia** per tal d'assolir la energia desitjada calculada durant les proves fetes el 25 de setembre.
- **Augment del voltatge** per tal d'evitar els problemes de saturació de l'inversor.
- **Disminució de la batalla del vehicle** reduint la longitud total del pack.

Com a contrapartida:

- Hi ha un **augment de pes** de 3,92 kg.
- **Augment de l'amplada** del pack degut a la major quantitat de *stacks* a la caixa.

5.1.4.3. Noves consideracions

Després d'escollir aquestes opcions es van tenir en compte altres aspectes que no s'havien tingut en compte en el càlcul d'energia inicial.

- Millora de la connexió elèctrica
- Reducció del pes del vehicle xifrada en 20 kg.

En el primer cas, tenint en compte les proves realitzades a la planta 11 de l'Escola (proves que s'explicaran amb detall en l'apartat 5.2) amb les mostres de connexió soldada per ultrasò, es passaria de tenir unes pèrdues properes de 1,32 kWh a tenir unes pèrdues de 0,21 kWh. Per tant, l'energia necessària per completar una **Endurance a ritme elevat seria de 7,44 kWh**.

Per al segon cas es va utilitzar el model del Victor Calvo, on es va analitzar la influència de la reducció de pes en el càlcul d'energia.

Amb aquestes noves dades l'equip va decidir realitzar un nou excel. Donades les dades de les cel·les, alumini i fibra de vidre utilitzats en la construcció de la caixa i imposant valors objectius com el voltatge, l'energia i la quantitat de mòduls per stack, el programa calcula quines són les millors configuracions amb una equació de ponderació amb valors imposats per l'usuari.

Dades Bateria CAT10e

Gruix parets (mm)	2,3
Gruix base (mm)	3,2
Angle pilot	35
Alçada BMS (mm)	45,12
Parets internes (%)	75
Densitat alumini (g/mm³)	0,0027
Gruix fibra de vidre (mm)	2
Paral·lel	3
Pes caixa de control (g)	979,4

Longitud refrigeració (mm)

15

Gruix tacs (mm)

20

Taula 5.7: Dades mecàniques de la bateria del CAT10e introduïdes al programa

Objectiu CAT10e

Voltatge (V)

430

Energia (kWh)

6,6

Mòduls per Stack

2

Taula 5.8: Paràmetres límit de la bateria introduïts al programa

Núm.	Cel·la	Mod.	es pe	Stack	ge pe	i per	atge Ma	tge Nor	ja Teòric	nplada	nplad	Amp	gitud	ngitu	% Long	Pes (kg)	Δ Pes	% P	VOLTA	ENE	AMP	LONG	PES	Coli	TOTAL
10	95	10	9.5	5	79.8	5.7	399	351.5	6.9597	366	-85	-19	427	104	32	39.95	-0.14	-0.4	0.00	0.58	0.53	0.95	0.99	0.48	0.59
19	95	19	5.0	10	39.9	2.8	399	351.5	6.9597	694	243	54	217	-106	-33	40.16	0.06	0.2	0.00	0.58	0.05	1.00	0.98	0.46	0.57
32	96	12	8.0	6	67.2	4.8	403.2	355.2	7.03296	439	-12	-3	343	20	6	40.26	0.17	0.4	0.14	0.70	0.42	0.97	0.97	0.56	0.69
36	96	16	6.0	8	50.4	3.6	403.2	355.2	7.03296	584	133	29	259	-64	-20	40.41	0.31	0.8	0.14	0.70	0.21	0.99	0.96	0.55	0.67
74	98	14	7.0	7	58.8	4.2	411.6	362.6	7.17948	511	60	13	301	-22	-7	41.13	1.04	2.6	0.41	0.96	0.32	0.98	0.90	0.70	0.87
89	99	9	11.0	5	83.2	5.9	415.8	366.3	7.25274	331	-120	-27	469	146	45	41.49	1.40	3.5	0.54	0.91	0.58	0.94	0.87	0.75	0.92
91	99	11	9.0	6	69.3	4.9	415.8	366.3	7.25274	403	-48	-11	385	62	19	41.47	1.38	3.4	0.54	0.91	0.47	0.96	0.87	0.74	0.92
98	99	18	5.5	9	46.2	3.3	415.8	366.3	7.25274	657	206	46	259	-64	-20	41.89	1.80	4.5	0.54	0.91	0.11	0.99	0.84	0.73	0.90
110	100	10	10.0	5	84.0	6.0	420	370	7.326	366	-85	-19	427	104	32	41.88	1.79	4.5	0.68	0.78	0.53	0.95	0.84	0.77	0.95
120	100	20	5.0	10	42.0	3.0	420	370	7.326	729	278	62	217	-106	-33	42.25	2.15	5.4	0.68	0.78	0.00	1.00	0.81	0.75	0.92
152	102	12	8.5	6	71.4	5.1	428.4	377.4	7.47252	439	-12	-3	385	62	19	42.84	2.74	6.8	0.95	0.52	0.42	0.96	0.77	0.81	1.00
157	102	17	6.0	9	47.6	3.4	428.4	377.4	7.47252	621	170	38	259	-64	-20	42.89	2.79	7.0	0.95	0.52	0.16	0.99	0.76	0.80	0.99
213	104	13	8.0	7	62.4	4.4	436.8	384.8	7.61904	476	25	6	343	20	6	43.54	3.45	8.6	0.78	0.26	0.37	0.97	0.71	0.68	0.84
216	104	16	6.5	8	54.6	3.9	436.8	384.8	7.61904	584	133	29	301	-22	-7	43.81	3.71	9.3	0.78	0.26	0.21	0.98	0.69	0.67	0.83
234	105	14	7.5	7	63.0	4.5	441	388.5	7.6923	511	60	13	343	20	6	44.12	4.03	10.1	0.65	0.13	0.32	0.97	0.66	0.59	0.73
235	105	15	7.0	8	55.1	3.9	441	388.5	7.6923	549	98	22	301	-22	-7	44.01	3.92	9.8	0.65	0.13	0.26	0.98	0.67	0.59	0.73

Figura 5.4: Comparació de configuracions per als paràmetres introduïts de les taules 5.7 i 5.8 i la cel·la número 407.

A partir d'aquest excel molt més complet ja que engloba els dos anteriors i a més a més la configuració mecànica de la bateria, es van poder treure possibles configuracions a comparar amb les dues anteriors.

A continuació es mostra una taula resum de les 12 millors configuracions extretes de l'anàlisi d'aquest programa. (Sempre comparant amb les dades de la bateria del CAT09e)

Configuració	Mòduls per stack	Cel·la	Energia [kWh]	Voltatge [V]	Longitud [mm]	Amplada [mm]	Pes [kg]
98s3p	3	392	6,85	411,6	-21	60	0,21
	3	407	7,18	411,6	-21	56	1,07
102s3p	3	389	6,9	428,4	-34	92	1,48
	3	407	7,47	428,4	-63	164	2,83
	2	385	6,79	428,4	5	17	0,22
	2	392	7,1	428,4	-63	176	1,9
	2	407	7,5	428,4	-63	170	2,8
104s3p	2	385	6,9	436,8	53	-11	1,12
	2	407	7,6	436,8	-22	133	3,71
105s3p	2	385	7	441	53	-37	1,34
	2	385	7	441	101	-66	1,47
		407	7,7	441	-22	98	3,92

Taula 5.9: Taula resum de les possibles configuracions per a la bateria del CAT10e

5.1.5. Configuració elèctrica final i cel·la escollida

Es van analitzar els pros i els contres que suposaven cada configuració en les diferents seccions del monoplaça. L'equip s'havia de posar d'acord en quina de totes era la que anava millor tant per dimensions geomètriques com elèctriques. Els objectius principals per a prendre la decisió eren:

- No augmentar batalla del vehicle
- Augmentar el mínim possible l'amplada
- Augmentar el mínim possible el pes
- En termes energètics, la opció escollida havia de complir el mínim necessari per a realitzar una *Endurance* a ritme alt: **7,44 kWh**

Finalment la configuració escollida va ser **104s3p** amb la cel·la número **407**.

Model	SLPBB042126	
Capacitat nominal	6,60 Ah	
Voltatge nominal	3,70 V	
Condicions de càrrega	Corrent nominal màxim	13,20 A
	Corrent de pic	26,40 A (< 1 s)
	Voltatge màxim	4,20 V
Condicions de descàrrega	Corrent nominal màxim	99,00 A
	Corrent de pic	132,00 A
	Voltatge mínim	3,00 V
Resistència interna	< 1,5 mΩ	
Cicles de vida (carregant: 1C; descarregant: 15C)	> 100 cicles	
Rang de temperatures de treball	Càrrega	0 °C ~ 45 °C
	Descàrrega	-20 °C ~ 60 °C
Dimensions de la cel·la	Gruix (T)	10,4 mm
	Amplada (W)	42 mm
	Alçada (L)	127,5 mm
	Distància entre borns	21 mm
Dimensions dels borns de la cel·la	Amplada	12 mm
	Gruix	0.2 mm
	Alçada	35 mm
Pes	129 g	
Química	LiCoO ₂	

Taula 5.10: Taula d'especificacions de la cel·la escollida per al CAT10e [16]

Configuració elèctrica	104s3p	Capacitat	19,80 Ah
Voltatge màxim	436,8 V	Corrent de càrrega constant	39,60 A
Voltatge nominal	353,6 V	Corrent de descàrrega constant	297,00 A
Voltatge mínim	312 V	Corrent de descàrrega de pic	396,00 A
Nombre de cel·les	312 unitats	Energia	7 kWh

Taula 5.11: Especificacions de la bateria de CAT10e

Finalment hem de tenir en compte en quants *stacks* dividirem la nova bateria per tal de complir amb la normativa [1], que com s'ha dit anteriorment, segons l'article EV3.3.3 cada *stack* no pot superar els 120 V ni els 6 MJ d'energia.

Configuració elèctrica	16s3p
Voltatge màxim	67,20 V
Voltatge nominal	59,20 V
Voltatge mínim	48,00 V
Energia	1172,16 Wh (4,22 MJ)
Nombre de cel·les	48 unitats

Taula 5.12: Especificacions d'un stack

A diferència de CAT09e, a la nova bateria i per tal de que a l'hora de muntatge i manteniment no es treballi amb molta energia, cada *stack* el formaran dues parts que anomenarem a partir d'ara mòduls.

L'interior de la bateria queda dividit, per tant, en 13 mòduls. Així doncs, cada dos mòduls formaran un *stack* i ens quedarà l'últim dels quals que estarà format, només, per un mòdul.

Configuració elèctrica	8s3p
Voltatge màxim	33,60 V
Voltatge nominal	29,60 V
Voltatge mínim	24,00 V
Energia	586,08 Wh (2,11 MJ)
Nombre de cel·les	24 unitats

Taula 5.13: Especificacions d'un mòdul

5.1.6. Camí de corrent

En la següent figura es mostra un esquema del camí de corrent de la nova bateria. En blau s'indica la connexió entre les cel·les. En groc, la connexió entre *stacks*, *Maintenance plugs*. Finalment en vermell i negre, els terminals de la bateria, punts per on es connecta tota la bateria a la resta del sistema.

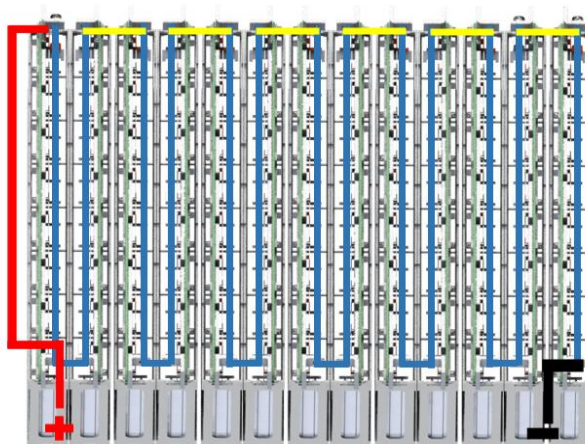


Figura 5.5: Esquema del camí de corrent de la bateria de CAT10e

5.2. Connexionat de potència

5.2.1. Soldadura per ultrasò

S'han assajat dos muntatges amb diferents configuracions elèctriques: **1s3p** i **3p1s**.

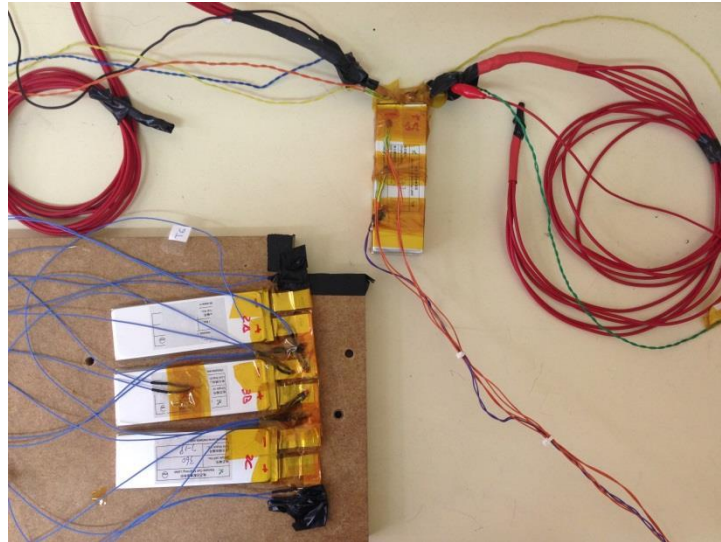


Figura 5.6: Muntatges 1s3p (a dalt) i 3s1p (a baix)

S'han escollit aquestes configuracions ja que la bateria que s'ha dissenyat pel monoplaça d'aquesta temporada és de configuració 3 paral·lel i el muntatge 1s3p és la mínima expressió de dita bateria. Amb el muntatge 3s1p es busca poder caracteritzar completament una cel·la que està connectada a cel·les a ambdós costats amb el mètode de soldadura per ultrasò.

A cada muntatge se li van realitzar tres tests. Dos descàrregues a corrent constant de 10 A i 30 A respectivament i un test on el muntatge era sotmès a un perfil de corrent per “steps”; més concretament eren *steps* de 10 segons de duració amb les intensitats que segueixen el perfil (5, 0, 10, 0, 20, 0, 30, 0, 50, 0, 80, 0, 100).

El motiu dels assajos estacionaris era avaluar la distribució de temperatures. Es van realitzar a dues intensitats diferents ja que les cel·les tenen diferent rendiment tèrmic a diferents C de descàrrega. Per altra banda, la finalitat de l'assaig per *steps* era observar els “*voltage drop*” (caigudes de potencial degudes al pas del corrent) ja que aquesta caiguda permet calcular directament la resistència del contacte elèctric.

Els resultats d'aquests assajos es van comparar amb els del connexionat de CAT09e. A continuació es pot veure la comparativa dels *voltage drop* de la connexió soldada per ultrasons (blanc) versus la connexió cargolada (gris). A la imatge es representa el voltatge

(a dalt) i la intensitat (a baix).

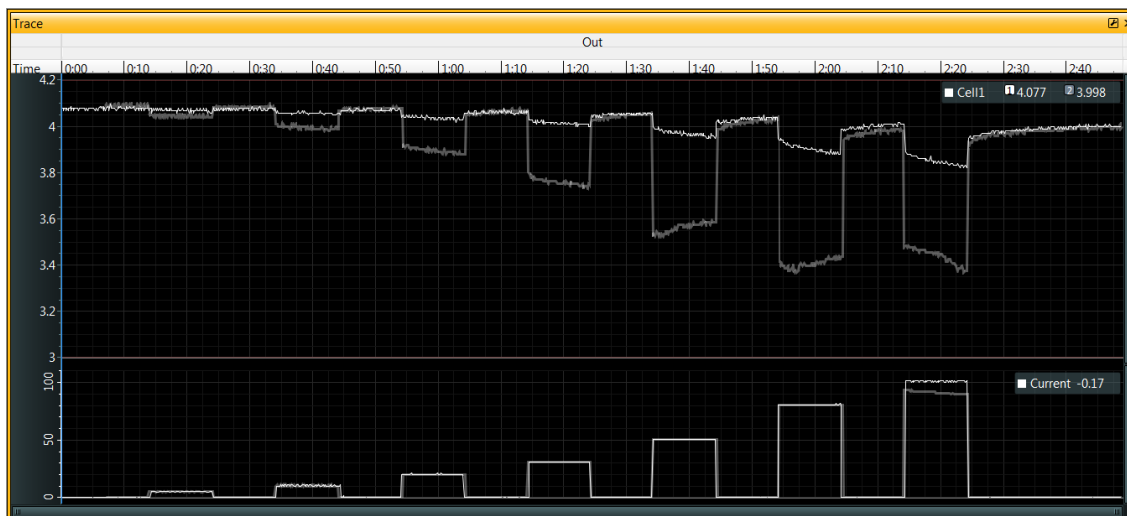


Figura 5.7: Resultats comparatius de la descàrrega steps per connexió per ultrasò enfront cargolada

La millora és abismal. Amb una intensitat de 80 A, en la connexió per ultrasò apareix un *voltage drop* de tan sols 100 mV respecte els 644 mV de la connexió cargolada. Aquesta millora s'ha mantingut en totes les repeticions dels assajos pel que es considera un resultat vàlid.

Referent a les temperatures, si s'observen les temperatures màximes en l'assaig de descàrrega estacionària a 50 A del muntatge 1s3p soldat per ultrasò respecte el mateix muntatge amb connexió cargolada, la millora és evident.

Temperatures [°C]	Connexió cargolada*	Connexió soldada per ultrasò**
Cos de la cel·la	28,00	43,32
Connexió	86,64	50,23
Tab negatiu	44,78	48,49
Busbar	45,69	50,87

Taula 5.14: Comparació de temperatures entre connexió cargolada i connexió soldada per ultrasò

*A l'assaig de la connexió cargolada es va haver de parar als 3:20 minuts per temperatura màxima.

****A l'assaig de la connexió soldada per ultrasò es va poder descarregar la cel·la en la seva totalitat (18:40 minuts)**

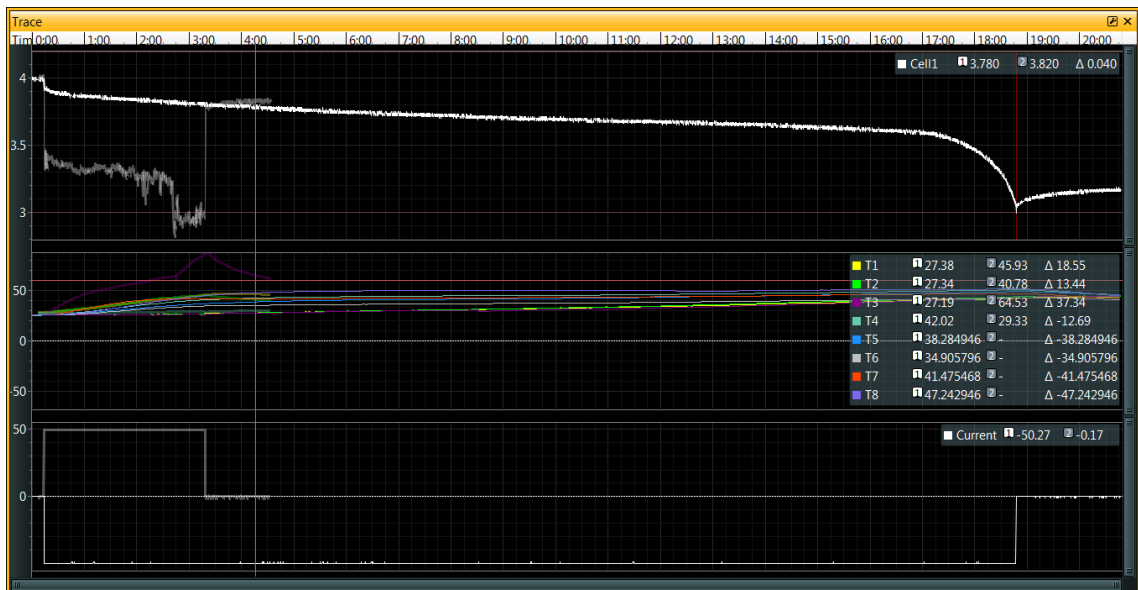


Figura 5.8: Assaig a 50 A connexió cargolada (colors difuminats) i connexió soldada (colors més forts)

En aquesta imatge es pot veure el voltatge (adalt), l'evolució de les temperatures (al mig) i la intensitat constant de 50 A (abaix).

La millora és més que evident. Al fet de poder descarregar la cel·la per complet se li suma que les temperatures no han superat pràcticament els 50 °C.

Un cop comprovat que la connexió soldada per ultrasò és molt millor que la cargolada, es prossegueix a analitzar en més detall els seus resultats.

Si es pren especial atenció a les dades de temperatura de les descàrregues contínues tant de 10 A com de 50 A al muntatge de 1s3p, es pot veure com el punt més calent és la busbar que, a la vegada, escalfa tant la connexió com el tab. És necessari, per tant, realitzar un altre test amb busbar de 2mm de gruix per a poder analitzar la distribució de temperatures de manera correcta.

Temperatures [°C]	Descàrrega a 10 A	Descàrrega a 50 A
Cos de la cel·la	27,85	41,96
Cos de la cel·la	28,93	43,32
Cos de la cel·la	28,79	41,68
Soldadura	36,27	50,23
Tab negatiu	34,10	48,98
Tab positiu	35,47	41,98
Busbar positiva	45,79	46,52
Busbar negativa	39,33	50,87

Taula 5.15: Temperatures finals del muntatge 1s3p

A la descàrrega de 50 A del muntatge 3s1p, el punt més calent és la cel·la. Això té sentit ja que al 1s3p el corrent que veu cada cel·la es divideix per 3 mentre que al 3s1p, en canvi, totes les cel·les veuen tot el corrent. Això és degut al diferent rendiment de les cel·les a diferents intensitats de descàrrega com s'ha comentat anteriorment. La part positiva en qualsevol cas és que la connexió no ha sigut el focus de calor en cap dels assajos.

Per a poder avaluar quantitativament el contacte, es pot calcular la resistència elèctrica equivalent a partir del *voltage drop* i la intensitat de descàrrega amb la següent equació.

$$R_{eq} = \frac{V_{drop}}{I_{descàrrega}} \quad (Equació 5.1)$$

De manera que és senzill calcular-lo per ambdós connexionats i per a tots els *steps* realitzats.

Intensitat de descàrrega [A]	Req connexió cargolada [$m\Omega$]	Req connexió soldada ultrasò [$m\Omega$]
5	8	4
10	10	2
20	9	1
30	10	1
50	10	1
80	8	1
100	6	1

Taula 5.16: Resistències equivalents dels muntatges cargolat i soldat 1s3p

El connexionat soldat per ultrasò no només mostra menor resistència sinó que també és més constant a diferent amperatge. Per a comparar-lo amb la dada tècnica de les cel·les, aquestes tenen una resistència interna de 2 $m\Omega$ que al estar connectada en un triple paral·lel resulta de 0,7 $m\Omega$. És a dir, que la connexió suposa menys resistència elèctrica que la pròpia cel·la.

Una altra manera de comprovar si la connexió és bona és comparar el *drop* del muntatge sèrie amb el paral·lel. Si s'agafen els valors de *voltage drop* d'una cel·la per a 30 A al paral·lel i 10 A a la sèrie i es calculen les resistències internes seguint la fórmula anterior, s'obtenen els següents valors:

	Muntatge 1s3p a 30 A	Muntatge 3s1p a 10 A
Req [$m\Omega$]	1	6

Taula 5.17: Valors de resistència equivalent al mateix amperatge de cel·la

El cas ideal per al muntatge 3s1p seria una resistència interna de 6 $m\Omega$ ja que és la suma de les resistències internes de les tres cel·les. Així doncs, en aquest cas, el contacte s'assumeix com a perfecte. En referència al muntatge de 1s3p, teòricament la resistència equivalent té el valor de, com ja s'ha comentat anteriorment, 0.7 $m\Omega$. Això significa que el fet de connectar els tres tabs i la busbar amb la mateixa soldadura per ultrasò només ha augmentat la resistència en 0.3 $m\Omega$.

Aquests resultats són molt bons però es creu que si es pogués augmentar la superfície de soldadura amb un sonotrodo major o soldant dues vegades en dues zones diferents per cada tab, això milloraria el contacte.

També es creu necessari repetir els assajos del 1s3p amb busbar de coure de 2mm de gruix i també amb busbar d'alumini per a comprovar si amb l'alumini els resultats són igual de positius. Afegir que, els muntatges seran sotmesos a un banc de vibracions per a comprovar la seva resistència mecànica.

5.2.2. Experimentació dels materials de les busbars

L'objectiu d'aquest grup d'experiments ha sigut el poder escollir el material més adequat per les busbars de la bateria del monoplaça de competició, el CAT10e.

S'han assajat dos muntatges amb una configuració elèctrica de 1s3p; un amb busbars d'alumini i l'altre amb busbars de coure.

S'ha escollit alumini de la sèrie 5005 ja que presenta una de les millors conductivitats d'aquest material, i un coure de puresa 99.95%.

S'han realitzat els càlculs pertinents per a dimensionar la secció necessària pel pas del corrent tenint en compte les diferents propietats conductores d'ambdós materials. D'aquesta manera ha resultat una secció d'alumini de 44 mm² distribuïda per raons de package en 22x2 mm. De la mateixa manera, la secció de coure s'ha calculat en 30 mm² i s'ha distribuït com 15x2 mm.

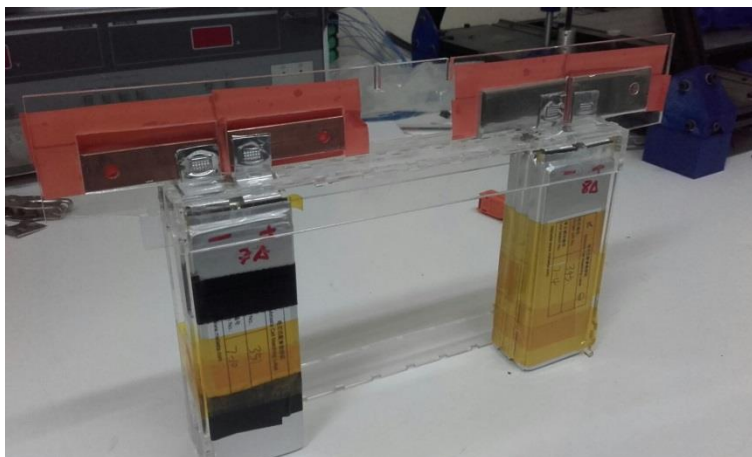


Figura 5.9: Muntatges 1s3p amb busbar d'alumini (dreta) i coure (esquerra)

S'han soldat busbars de les dimensions comentades a partir de la tècnica de soldadura per ultrasò a les cel·les SLPBB042126 de Melasta [15], les cel·les escollides per a la bateria del

CAT10e. Aquestes cel·les tenen el *tab* negatiu fet de coure estanyat i el positiu d'alumini, ambdós de 0,2 mm de gruix.

Així doncs s'han realitzat proves per a trobar els paràmetres oportuns per a totes les combinacions de materials necessàries:

	Tab d'Al en busbar d'Al	Tab de Cu en busbar d'Al	Tab d'Al en busbar de Cu	Tab de Cu en busbar de Cu
Energia (J)	200	300	250	260
Pressió (psi)	32	35	42	40
Amplitud (micres)	35	40	42	43
After Bus Delay (s)	0,2	0,2	0,2	0,2
After Bus (s)	0,5	0,5	0,5	0,5
Hold Time (s)	1	1	1	1

Taula 5.18: Paràmetres de soldadura

A cada muntatge se li han realitzat 3 tests. Dues descàrregues a corrent constant de 30 A i 80 A i un test on el muntatge era sotmès a un perfil de corrent per steps; concretament eren steps de 10 segons de duració amb les intensitats que segueixen el perfil (5, 0, 10, 0, 20, 0, 30, 0, 50, 0, 80, 0, 100).

El motiu dels assajos estacionaris era avaluar la distribució de temperatures. S'han realitzat a dues intensitats diferents ja que les cel·les, com ja s'ha dit anteriorment, tenen diferent rendiment tèrmic a diferents C de descàrrega. Per altra banda la finalitat de l'assaig per steps és observar els voltage drop, ja que aquesta caiguda de potencial permet avaluar directament la resistència del contacte elèctric.

Els resultats de l'assaig de descàrrega estacionària a 30 A, es poden veure a continuació amb la comparativa dels voltage drop del muntatge amb busbars d'alumini (blanc) versus el muntatge amb busbars de coure (gris). A la imatge següent es poden veure representats a dalt el voltatge (V) i abaix la intensitat (I).

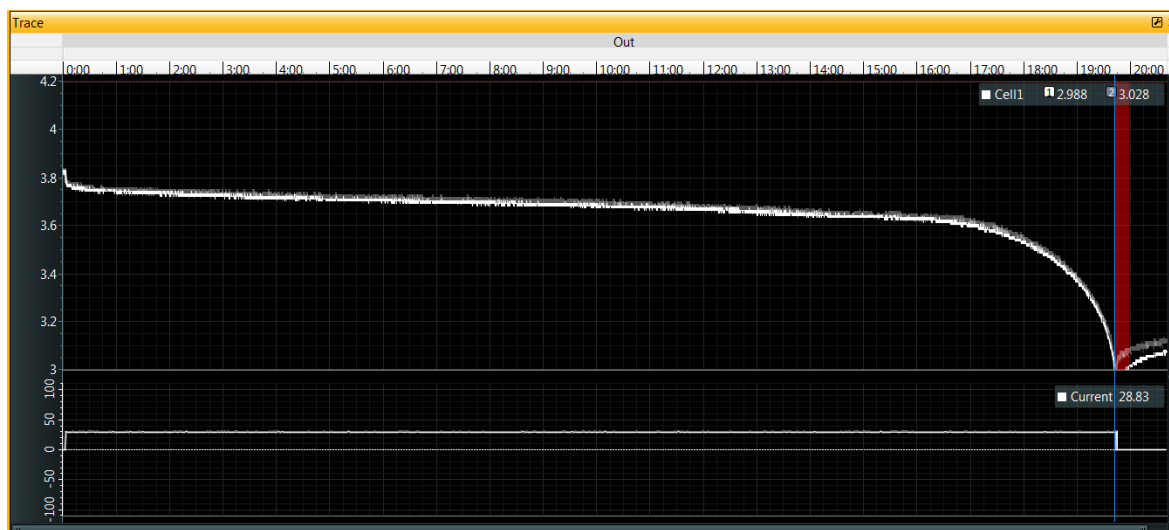


Figura 5.10: Resultats comparatius de la descàrrega estacionària a 30 A de busbars d'alumini vs coure.

Des del punt de vista elèctric, amb una intensitat de 30 A, no hi ha pràcticament cap diferència. Serà necessari, per tant, recórrer a descàrregues a major intensitat per a poder apreciar alguna diferència elèctrica.

Referent a les temperatures sí que es poden observar algunes diferències:

Temperatures [°C]	Muntatge amb busbar d'alumini	Muntatge amb busbar de coure
Cos de la cel·la	33,74	35,07
Soldadura negatiu	30,19	36,27
Tab negatiu	33,13	35,05
Busbar negatiu	31,33	35,81
Tab positiu	32,38	32,38
Busbar positiu	29,67	35,44

Taula 5.19: Temperatures finals de la descàrrega estacionària a 30 A

Aparentment des del punt de vista tèrmic, el coure es comporta de pitjor manera. Té sentit ja que la superfície de la busbar d'alumini és 1,5 vegades major que la del coure, el que resulta un 50% més de superfície de convecció.

A partir d'aquest punt, es va dessoldar el *tab* negatiu de la busbar en el muntatge de coure al manipular-lo.

Això també pot ser una causa de les diferències de temperatura entre les zones de la soldadura ja que en el coure la temperatura màxima es trobava a la soldadura, el que podria significar que els paràmetres trobats no eren els adequats.

Es va ressoldar la unió variant els paràmetres per uns amb major energia, es mostren a continuació:

Tab de Cu en busbar de Cu 2.0	
Energia (J)	300
Pressió (psi)	42
Amplitud (micres)	45
After Bus Delay (s)	0,2
After Bus (s)	0,5
Hold Time (s)	1

Taula 5.20: Paràmetres de ressoldadura

La unió, a simple vista, semblava sòlida però manipulant el muntatge, es va tornar a dessoldar el mateix *tab*. Per sort, s'havia ressoldat dos muntatges 1s3p idèntics per assajar repetitivitat al refer la soldadura. Aquest següent muntatge sí que es va poder assajar, però els resultats queden lluny dels obtinguts a les proves preliminars realitzades amb busbars de coure de 0,5 mm de gruix.

En la següent imatge es poden veure comparades les variacions de voltatge produïdes pels *steps*, tant de la prova realitzada amb el muntatge ressoldat (blanc), com de la prova realitzada en el conjunt de proves preliminar (gris).

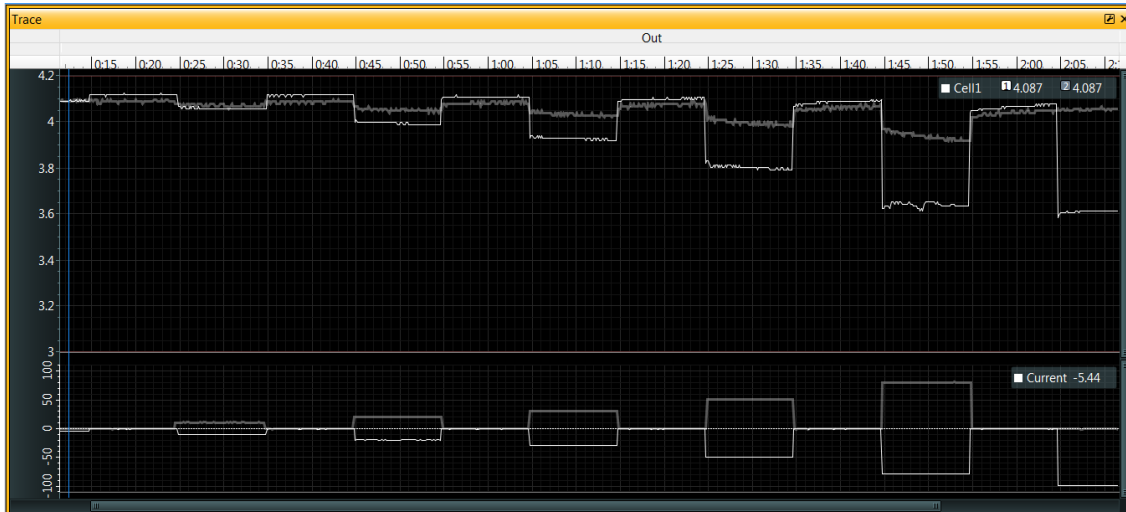


Figura 5.11: Resultats comparatius de la descàrrega de steps per a coure ressoldat

L'empitjorament és molt clar. Per a una intensitat de 80 A, el *voltage drop* ha passat de ser de 100 mV a ser de 460 mV. Per inspecció visual la soldadura sembla ser correcta si bé es pot apreciar clarament les irregularitats provocades per la segona soldadura al tab. Això no tan sols és degut a que ja existeixi una marca prèvia de soldadura, sinó que el fet de tornar a soldar amb una energia major ha fet que el tab es deformés. Una sospita sense confirmar és que tanta energia ha pogut dessoldar el tab del propi cos de la cel·la al seu interior, ja que aquesta connexió és pitjor que una connexió cargolada testejada en anteriors grups de proves.

Deixant de banda aquesta problemàtica, s'han realitzat steps al muntatge d'alumini que han pogut ser comparats amb els steps realitzats a les proves preliminars al muntatge 1s3p amb busbars de coure de 0,5 mm de gruix. Es poden comparar els resultats ja que el gruix de la busbar no influeix al contacte elèctric, només a l'eficiència tèrmica.

A continuació es mostren comparades les descàrregues per steps amb busbar d'alumini (blanc) versus busbar de coure (gris).



Figura 5.12: Resultats comparatius de la descàrrega de steps per alumini vs coure

A la figura 5.12 podem observar unes rectes molt paral·leles, i és que les diferències entre una i altra són mínimes. Tant és així, que és necessari veure-les tabulades.

Intensitat [A]	Voltage drop busbar alumini [mV]	Voltage drop busbar coure [mV]
5	10	10
10	10	10
20	19	20
30	39	40
50	60	59
80	99	99
100	129	128

Taula 5.21: Comparativa voltage drop busbar alumini vs coure

A partir d'aquestes dades es demostra que ambdós metalls són igual de bons per al contacte elèctric.

Basant-nos en els resultats, als problemes per trobar uns paràmetres vàlids per a soldar coure amb coure, a la major lleugeresa que proporciona i a l'estalvi econòmic, s'ha decidit optar per les busbars d'alumini.

Però abans d'assegurar aquesta elecció, s'ha realitzat una descàrrega a corrent estacionari de 80 A per a comprovar si tèrmicament també és vàlida. És a dir, es busca poder descarregar el muntatge 1s3p a 80 A per complet sense que la connexió, busbar o cel·la, superin els 60 °C que fixa la normativa [1]. Cal dir que 80 A seria la intensitat RMS que s'extrauria de la bateria si es realitzés la prova de la *Endurance* al ritme més elevat que permet el cotxe dinàmicament.

Els resultats de la corba de descàrrega, així com l'evolució de temperatures, es poden veure a la següent figura. I les temperatures màximes poden veure's tabulades a la taula 5.22.

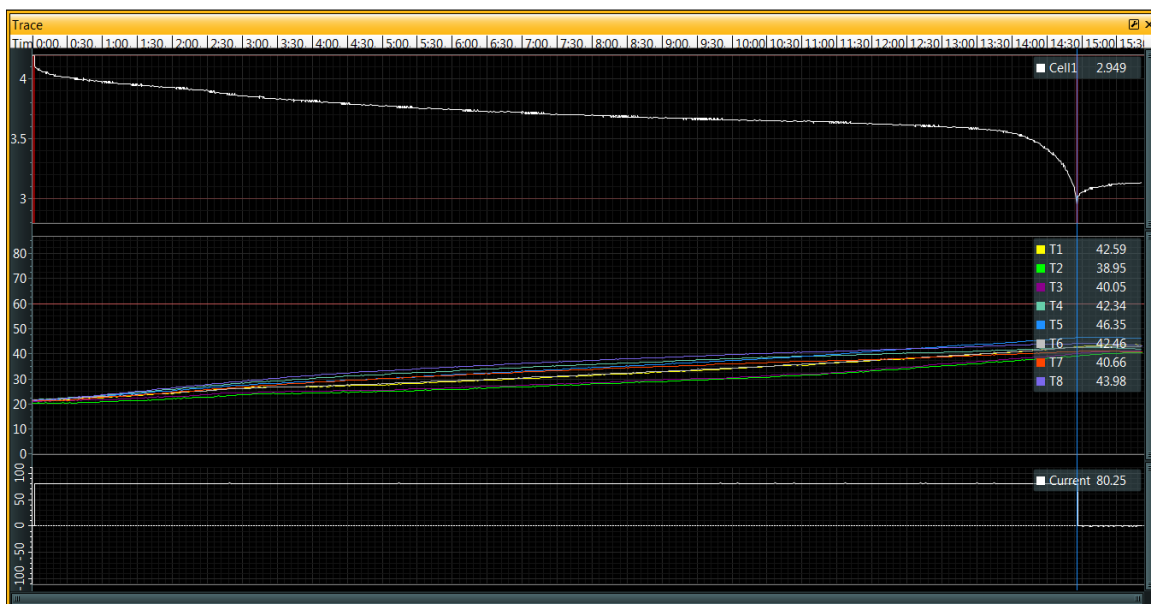


Figura 5.13: Evolució del voltatge i temperatura en la descàrrega estacionària a 80 A amb busbar d'alumini

Temperatures [°C]	
Cos de la cel·la	42,59
Cos de la cel·la	38,95
Cos de la cel·la	40,05
Soldadura	42,34
Tab negatiu	46,35

Tab positiu	42,46
Busbar positiva	40,66
Busbar negativa	43,98

Taula 5.22: Temperatures finals en la descàrrega de 80 A de la busbar d'alumini

D'aquí podem extreure que l'augment de temperatures és molt constant, reflex clar de l'homogeneïtat de la connexió. Afegir que, si s'observa la temperatura màxima, aquesta es troba situada al tab negatiu de la cel·la i no a la connexió o a la busbar. Dit d'una altra manera, el dimensionament tant de la connexió com de la busbar és l'apropiat ja que ara el coll d'ampolla es troba al tab de la cel·la, un element que des de l'equip no podem modificar.

5.2.3. Conclusions experimentals

De totes les proves que s'han realitzat podem extreure:

Dimensionant apropiadament les busbars d'alumini i de coure, aquestes no presenten diferències significatives a la conductivitat i al contacte elèctric. Tant és així, que part dels factors que han fet decantar la balança cap a l'alumini han estat externs: pes i cost. Encara que un factor molt important sí que té relació: la complicació de no trobar exactament els paràmetres vàlids per a poder soldar el coure amb garantia i el temor que la major energia necessària per a soldar el coure pogués malmetre la cel·la.

Una altra conclusió d'aquestes proves és que ressoldar una connexió no és una opció viable. La connexió queda molt empitjorada així que es recomana construir mòduls addicionals per a poder intercanviar tota la unitat si una connexió fallés.

Per últim, es recomana realitzar uns assajos de vibracions per a poder confirmar que la connexió no es degradarà durant el seu cicle de vida i es recomana també realitzar assajos de *pill* modificant els paràmetres de soldadura tant per a intentar millorar el contacte, com per comprovar si el fet d'haver de realitzar dues soldadures per busbar, va en detriment del rendiment de la primera. És a dir, si al realitzar la segona soldadura, les vibracions es transmeten fins a la primera, fent-la fràgil i empitjorant el contacte.

5.2.4. Disposició espacial de les cel·les.

En aquest apartat s'explicarà tant la posició de les cel·les dins la bateria, dins els mòduls, com la configuració mecànica d'aquests.

Un cop determinada quina és la configuració elèctrica de la bateria, en quants mòduls i stacks estarà dividida, quina és la millor soldadura pel connexionat de potència de les cel·les i amb quin material es realitzarà aquest connexionat hem de tenir en compte, com s'ha explicat a l'apartat 4.2, que la disposició de les cel·les dins la bateria sigui la més òptima per tal d'evitar el sobreescalfament de la cel·la situada al mig del 3 paral·lel.

Per aquest motiu, i després de varies reunions amb membres i exmembres de l'equip, s'ha decidit que la orientació de les cel·les dins un mòdul es rotarà 90° respecte la posició de les cel·les a la bateria de CAT09e

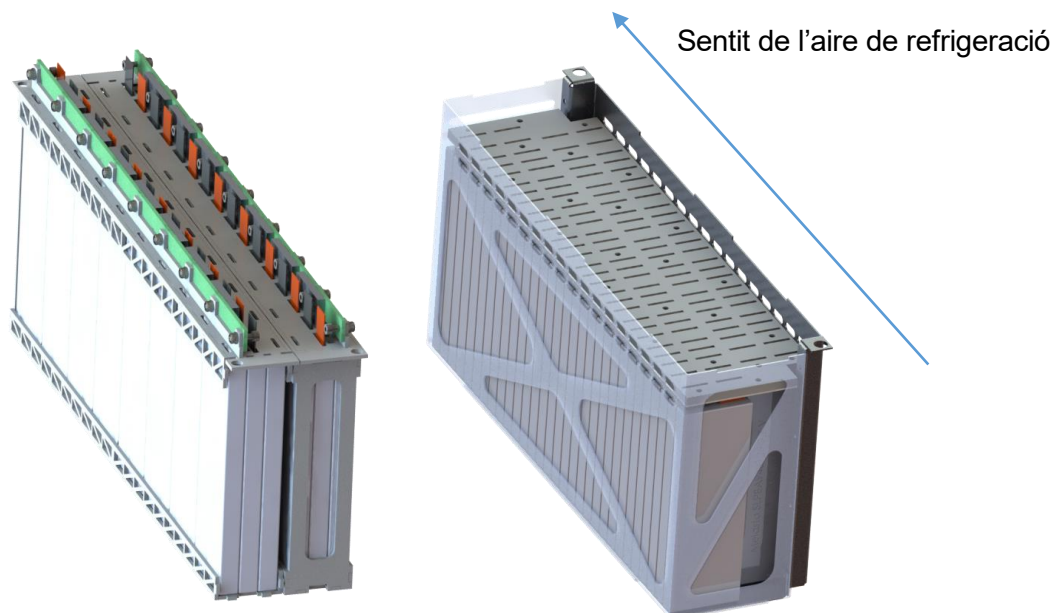


Figura 5.14: Stack de la bateria de CAT10e (esquerra) i de CAT09e (dreta)

Tal com es pot veure a la figura 5.14 amb el canvi d'orientació de les cel·les s'aconsegueix que el flux d'aire refrigeri més homogeniament cadascuna de les 3 cel·les que formen el paral·lel, cosa que, en la bateria del CAT09e no es produïa ja que l'aire refrigerava molt més una cel·la de les 3 que formaven el paral·lel.

5.2.4.1. Empaquetament de les cel·les. Mòdul i *stack*

Com ja s'ha comentat a l'apartat 5.3, la configuració elèctrica de la bateria del CAT10e serà de 104s3p, formada per 13 mòduls de 8s3p cada un.

Primer de tot comentar que, com que s'ha augmentat el número de cel·les en sèrie en 9, això provoca un augment, per suposat, de la geometria de la caixa de bateries i, per tant, un augment de pes. Així doncs, un dels objectius del disseny mecànic serà optimitzar el pes dels components estructurals, aquesta decisió engloba, per tant, els mòduls.

Per aquest motiu, i a diferència de la bateria de la temporada passada, en cada mòdul enlloc d'utilitzar alumini, s'utilitzarà fibra de vidre i així poder optimitzar una mica més el pes.

La geometria d'aquests mòduls ha anat variant al llarg de la fase de disseny. L'objectiu principal era aconseguir el màxim espai obert per a tenir una bona refrigeració de les cel·les, però alhora havia de ser prou rígid com per poder sostenir 24 cel·les al seu interior així com també el seu connexionat. Després de varies simulacions i posteriors optimitzacions per tal d'assegurar la seva rigidesa, la geometria final la podem veure en la figura 5.15

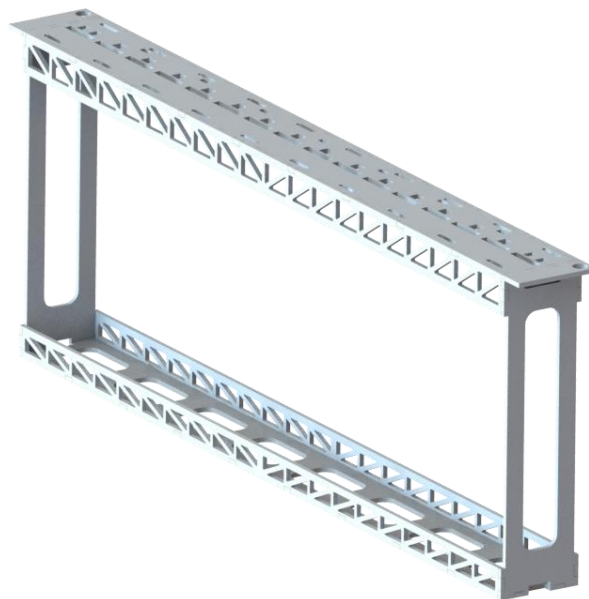


Figura 5.15: Mòdul de fibra de vidre

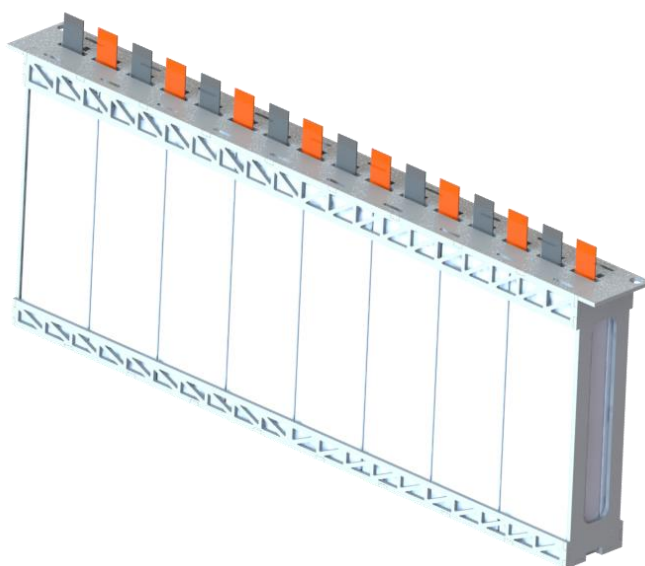


Figura 5.16: Mòdul amb les 24 cel·les

Aquesta geometria no compleix, però, la necessitat de separar la bateria en segments aïllants els uns amb els altres. És per això que es fa necessari recórrer a que les parets internes necessàries per normativa [1] formin part, per tant, de la mateixa caixa de bateries, tal com podem veure a la figura 5.17.



Figura 5.17: Caixa de bateries del CAT10e

Finalment es mostra la posició de les cel·les dins la caixa de bateries.

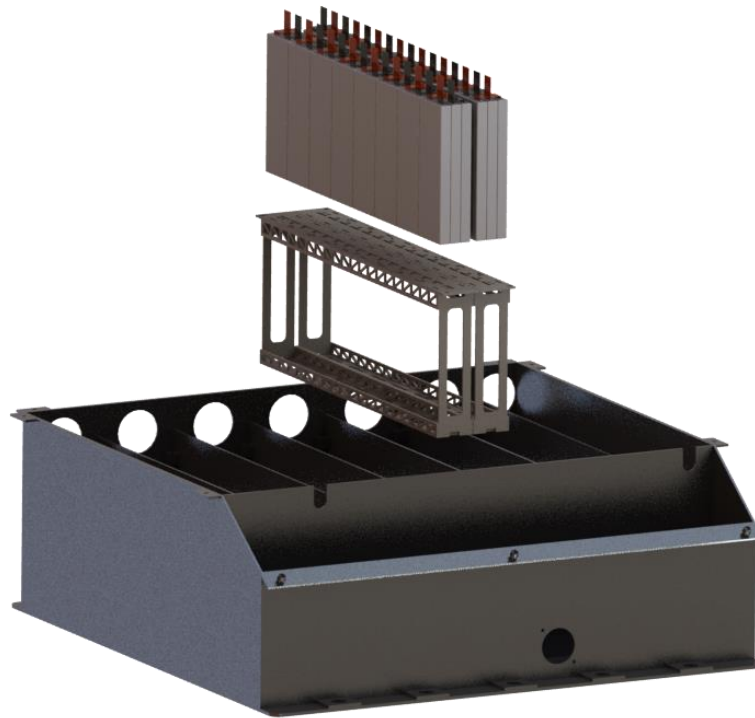


Figura 5.18: Vista explosionada de la posició de les cel·les dins la caixa de bateries

5.2.5. Connexió entre stacks. *Maintenance plug*

Tal com s'ha comentat a l'apartat 4.1.6.1 el stacks s'han d'interconnectar elèctricament entre sí per mitjà de *Maintenance plugs*.

Aquesta temporada un dels objectius del disseny de la bateria del CAT10e era incloure com a *Maintenance plug* uns connectors comercials per així evitar ser focus principal de les inspeccions tècniques de la bateria durant les competicions.

Recordem les principals característiques que, segons exigeix la normativa [1], ha de tenir un *Maintenance plug*:

- Ha de permetre la separació elèctrica dels segments interns de la bateria tal que cada un contingui un voltatge màxim de 120 VDC i una energia màxima de 6 MJ
- Aquesta separació ha d'afectar els dos pols de cada segment, incloent el primer i l'últim
- La separació ha d'utilitzar-se també quan la bateria està oberta per a manteniment
- La connexió no ha de requerir eines per posar o treure-la
- Els connectors han d'incloure *positive locking* (autoblocatge)
- Ha de ser físicament impossible una connexió diferent a la configuració per a la que

ha sigut dissenyada.

- La superfície de la connexió ha de ser aïllant i no permetre cap connexió elèctrica

Després de consultar varies empreses distribuïdores, els productes que més van satisfer les necessitats esmentades anteriorment han estat els connectors **B6AR-NS** i **SP6AR-N/25** de l'empresa *Multi-Contact* [16]. La fitxa tècnica d'ambdós connectors està adjuntada a l'annex d'aquest projecte.



Figura 5.19: Connector SP6AR-N/25 (esquerra) i B6AR-NS (dreta).

El sistema d'autoblocatge d'aquests connectors és l'anomenat *snap-in lock* i treballa amb la tècnica de “*push-pull*”. La femella conté una anella d'acoblament desplaçable i es bloqueja automàticament quan es connecta un connector amb l'altre. La desconexió s'efectua primer empenyent per tal de desbloquejar aquesta anella i finalment tirant per a aconseguir la separació dels connectors.

Es presenta a continuació l'aplicació d'aquests connectors a la bateria del CAT10e.

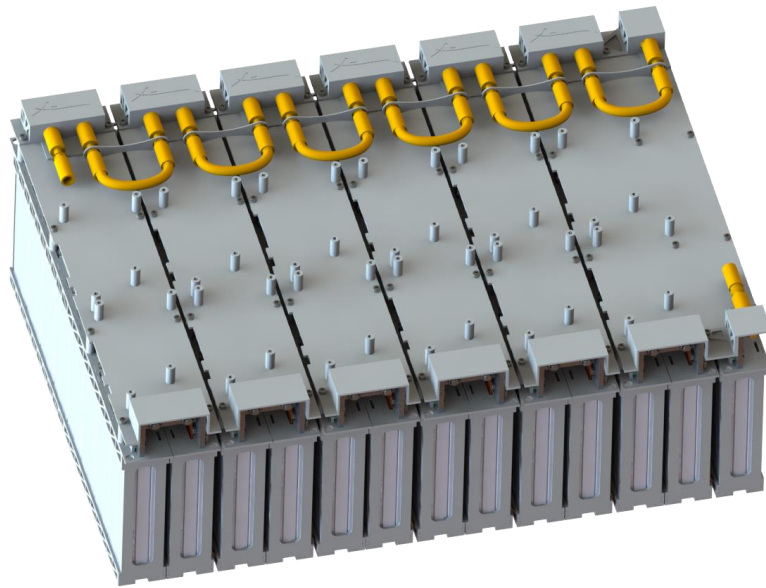


Figura 5.20: Connexió dels Maintenance plug entre els stacks de la bateria de CAT10e

A la figura 5.20 es pot observar com, apart de la connexió entre stacks, també s'utilitzen els connectors en el primer i l'últim pol de la bateria. Aquests reposaran sobre unes xapes de poliamida que seran utilitzades també per tancar i protegir el connexionat de potència com també per a sostenir el BMS (explicat en el següent apartat d'aquest projecte).

Per tal de complir amb la condició de que no ha de ser possible una connexió diferent a la que ha estat dissenyada, l'equip ha dissenyat i fabricat unes peces de fibra de vidre que mantenen els connectors amb una forma de U i així evitar la connexió a altres punts (peces en vermell a la figura 5.21)

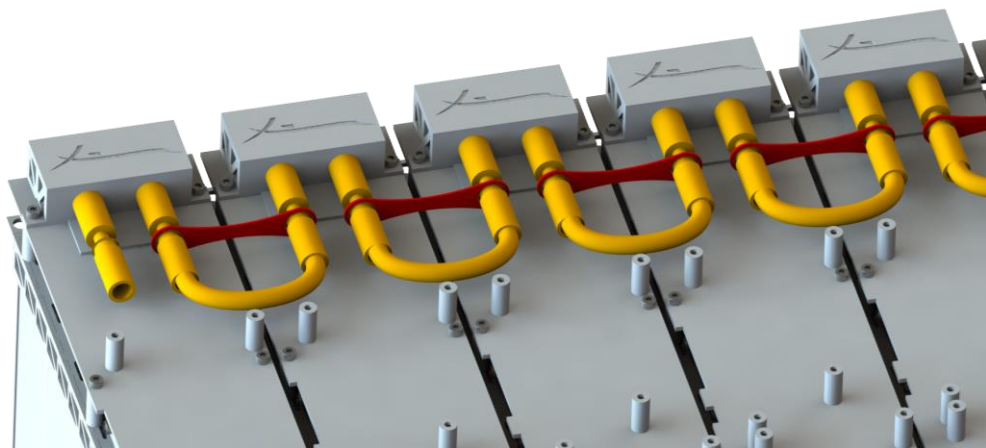


Figura 5.21: Aplicació de la peça per a mantenir el Maintenance plug en forma de U

5.3. EI BMS

Un dels principals problemes que l'equip es va trobar durant les proves a pista del CAT09e i les posteriors competicions va ser el funcionament i el rendiment del BMS.

Com ja s'ha explicat a l'apartat 4.1.4 el BMS que es portava era comercial i, per tant, no està dissenyat especialment per a satisfer les necessitats de la bateria d'un monoplaça de Fórmula Student.

El problema més gran que l'equip es va trobar va ser el desbalanceig d'algunes de les cel·les respecte a la resta de la bateria, concretament aquelles connectades directament a la placa Màster. Aquest problema era degut a que, com aquesta placa s'alimenta directament de les cel·les i no d'una manera externa, alhora d'enviar qualsevol tipus d'ordre a les *Slaves*, com per exemple l'ordre de balanceig, consumia molta energia i per tant les cel·les baixaven de voltatge molt més ràpid que la resta.

Un exemple clar d'aquest problema és que durant el viatge de tornada de la competició d'Itàlia (aquest va durar dos dies) les cel·les connectades a la Màster van anar perdent energia fins arribar als 0 volts. Com a solució, l'equip va ressetejar totes les plaques del BMS i va canviar l'*Stack* sencer que contenia les cel·les a 0 V, deixant el de recanvi al mateix estat de càrrega que la resta de la bateria, per estar apunt per a la competició de República Txeca.

Però un cop allà es va veure que dues de les plaques no duïen a terme correctament el procés de balanceig ja que teníem dos grup de cel·les clarament diferenciats.

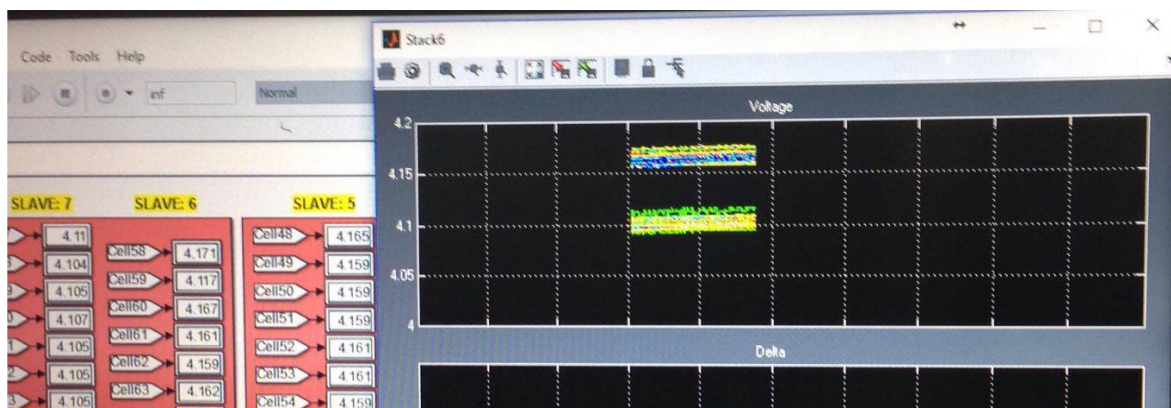


Figura 5.22: Desbalanceig de les cel·les en dos grups

A la figura 5.22 podem veure com un grup de cel·les està entre els 4,15 i 4,2 volts, mentre que l'altre grup de cel·les, corresponent a dues Slaves, està entorn els 4,1 volts.

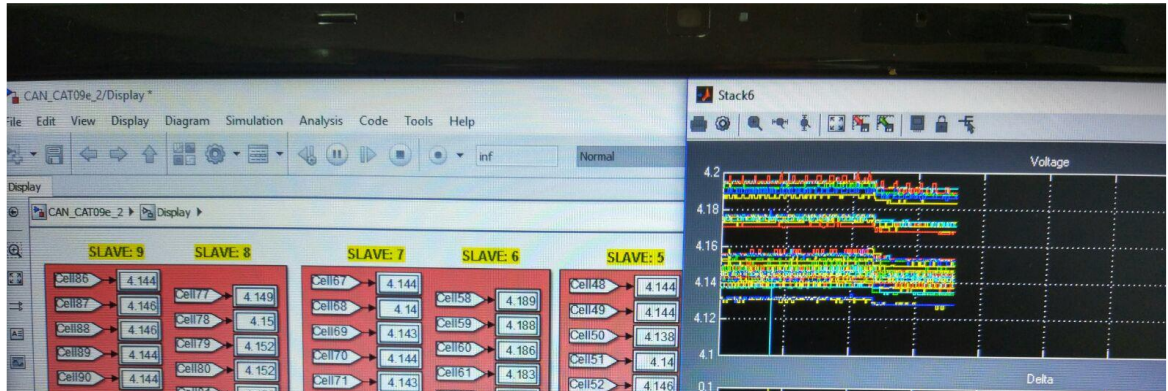


Figura 5.23: Desbalanceig de les cel·les en varis grups

A la figura 5.22 es pot observar com les línies de colors que fan referència al voltatge de cada cel·la no són rectes, sinó que formen petits *steps*. Això significa que s'està realitzant el balanceig, però aquest s'està produint entre cel·les del mateix grup i no entre totes les cel·les de la bateria.

Cal remarcar però, que tot i aquest problema de desbalanceig, el CAT09e va respondre a les posteriors competicions com s'esperava, regalant-nos una primera posició *overall* elèctric a FSCZ i una tretzena posició a FSS.

5.3.1. FreeSafe Extended FS-XT

Un cop tornat de competicions i ja ben entrada la nova temporada, l'equip es va posar en contacte amb l'empresa *Freemens* via *Skype* per tal d'explicar-los tot el que havia passat amb el seu BMS durant l'estiu i preguntar si sabien quin podia ser el motiu que expliqués el mal balanceig de les cel·les.

La seva resposta va ser que no sabien exactament què podia estar fallant i que, com aquest producte s'havia deixat de fabricar, no tenien personal que pogués ajudar amb la possible reparació. A partir d'aquí se li va oferir a l'equip la possibilitat de canviar la placa Màster per el nou model: *FreeSafe Extended FS-XT* [17]

Un dels primers motius que van portar a l'equip a plantejar-se si efectuar aquest canvi en el disseny de la bateria de *CAT10e* era el tamany de la nova placa.

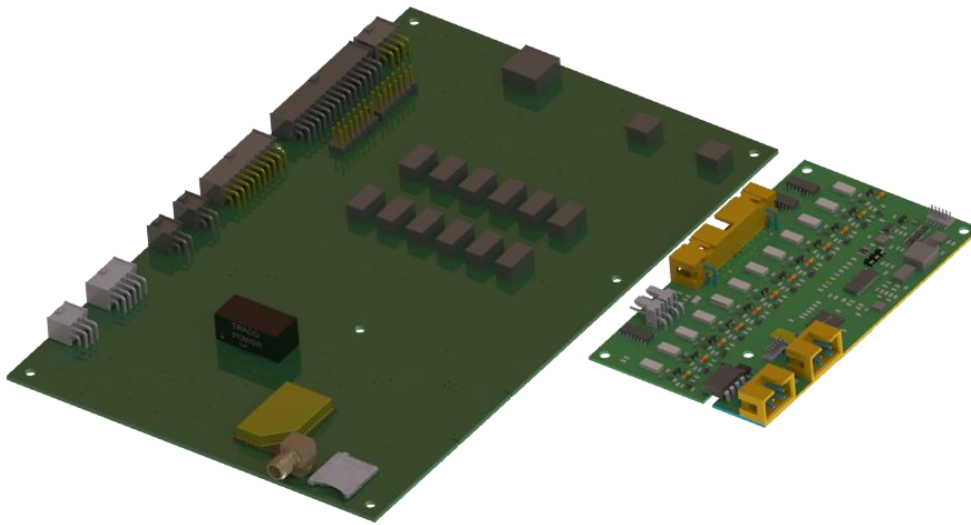


Figura 5.24: FreeSafe Extended FS-XT (esquerra) i FreeSafe FS02-M/S (dreta)

Primerament es volia provar el seu funcionament amb la bateria del CAT09e, però el seu tamany suposava un gran problema alhora de poder-la adaptar ja que, per exemple, s'havia de realitzar un cablejat diferent per a les cel·les que sensés i, a més a més, tapava gran part de les *Slaves* d'un dels *Stacks* de la bateria.

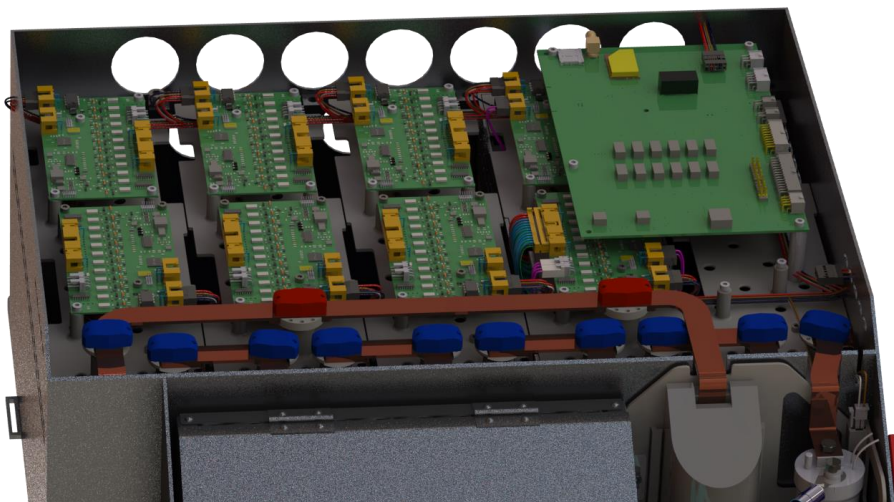


Figura 5.25: Aplicació de la FS-XT a la bateria del CAT09e

Cal dir que, tot i ser un canvi considerable de tamany respecte la placa antiga, la nova sensa 24 canals i mesura també el corrent. És per això que aquesta nova placa fa la funció de tres de les plaques antigues: la Màster, la PR i una *Slave*.

El segon i principal motiu pel qual no s'ha pogut aplicar aquest canvi ha estat el software. Després de llegir la fulla d'especificacions d'aquesta nova placa s'ha pogut veure que conté

dos xarxes de CAN: una no aïllada i interna entre plaques i una altra aïllada i externa a la resta del sistema, per on es llegiran les dades de les cel·les. El problema era que pel CAN extern només envia el valor de tres voltatges de la bateria: el màxim, el mínim i el mig. Aquest fet és un gran inconvenient, ja que la normativa [1] especifica a l'article EV 3.7.9 que, per seguretat, el BMS ha de ser capaç de llegir en tot moment el valor de voltatge de totes les cel·les de la bateria.

EV 3.7.9 The AMS must be able to read and display all cell voltages e.g. by connecting a laptop to the AMS.

Figura 5.26: Article EV 3.7.9 de la normativa de FSG2017

A causa d'això l'equip es va posar en contacte amb *Freemens* per a preguntar si es podia solucionar aquest inconvenient ja que sinó no es podia adaptar de cap manera el seu producte a la nova bateria del CAT10e. L'empresa va plantejar dues solucions possibles a estudiar:

1. En el pitjor dels casos es podia personalitzar el CAN intern de la placa per tal de poder llegir els voltatges directament des d'aquest
2. En el millor dels casos es podia redirigir tots els voltatges des del CAN intern fins al CAN extern

Cap d'aquestes dues solucions va resultar òptima ja que:

1. La primera obligava a utilitzar dos xarxes de CAN que treballaven a diferent referència de voltatges
2. En la segona, la transmissió de les dades de 140 cel·les podia durar un temps no menyspreable amb el risc de sobrecarregar els processos del BMS només per a gestionar els missatges del bus CAN

Finalment l'empresa va proposar una solució que podia ser adequada tant per les necessitats de la bateria com per a les seves restriccions.

Podien afegir un missatge addicional de 8 bytes, on es mostraven certs voltatges i temperatures. Cada 100 ms, per al següent missatge, el BMS canviaria l'identificador de voltatge o temperatura per tal de recórrer totes les cel·les i sensors. Això significava que, per a 104 cel·les, necessitava aproximadament uns 5 segons per a haver llegit totes les dades de la bateria.

A més a més aquesta implementació costava 1500€ per cada setmana que s'estigués

desenvolupant. Preu que l'equip va decidir no afrontar ja que ningú assegurava que en un futur no sorgissin altres dificultats amb aquesta placa.

5.3.1. *FreeSafe FS02-M/S*

Si al començament de la temporada de *CAT09e* ja es veia necessari la implementació d'un BMS que satisfés totes les necessitats d'una bateria per a un vehicle de Fórmula Student, després de tots els problemes sorgits durant la temporada es va decidir fer un gran pas endavant i començar a dissenyar un BMS propi de l'equip. Aquest desenvolupament s'explicarà al següent apartat 5.3.2.

Tot i prendre aquesta decisió s'ha de tenir en compte que un BMS és un sistema molt complex encarregat de la seguretat de la bateria i, per tant, de la seguretat tant del cotxe com del pilot. Per aquest motiu s'havia de tenir una segona opció que, mentre s'estigués desenvolupant i testejant i posant a punt el BMS de l'equip, era la que s'utilitzaria.

Després d'assegurar que *Freemens* seguia tenint estoc de plaques *FreeSafe FS02-M/S* [18], l'equip va decidir utilitzar el mateix BMS que a *CAT09e*, tenint en compte els problemes de balanceig sorgits la temporada anterior i tot i que no es seguís desenvolupant aquest producte.

Així doncs, el BMS quedava implementat a la bateria del *CAT10e* de la següent manera:

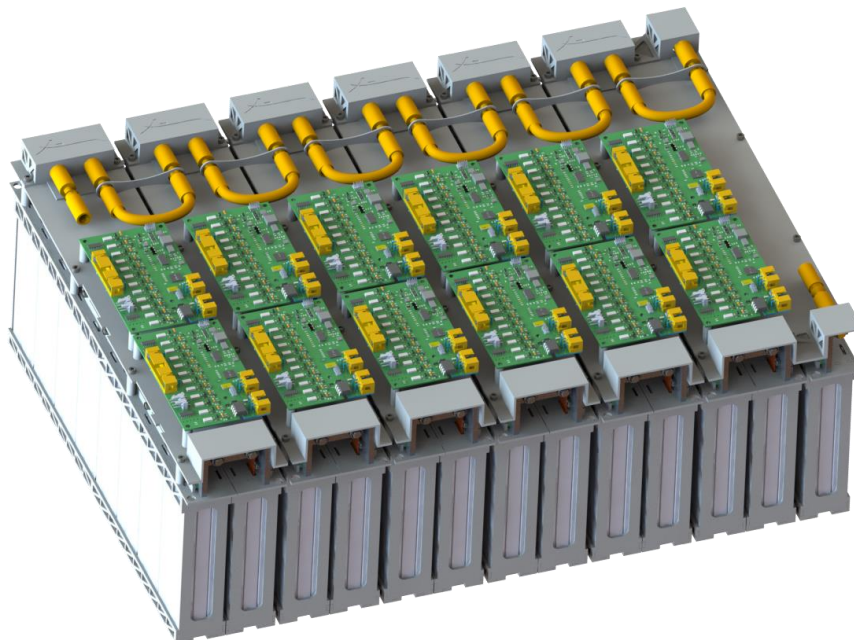


Figura 5.27: Implementació del BMS a la bateria del *CAT10e*

La *Slave* és capaç de sensar fins a 12 canals, així doncs, cada placa s'encarregarà de sensar un dels mòduls i d'aquesta manera es podran situar dues plaques de BMS sobre la xapa de poliamida que protegeix cada Stack, la mateixa placa on restaran els *Maintenance plugs*.

A la figura 5.27 es pot observar que un dels mòduls, el de la dreta de la figura, degut a la incompatibilitat de mides entre placa i mòdul, no conté cap placa damunt seu. La placa encarregada de sensar aquest mòdul és la Màster i estarà situada a la zona on es troben els elements de seguretat i gestió de la bateria. S'explicarà més detalladament a l'apartat 5.4.

Un tema molt important a tenir en compte alhora d'utilitzar aquest BMS i un dels punts en que l'equip s'ha bolcat més a solucionar és el sensat de temperatura. La normativa [1] de la competició especifica en l'article EV 3.7.4 que el BMS ha de monitoritzar la temperatura de com a mínim el 30% de les cel·les i, a més a més, les cel·les sensades han d'estar distribuïdes d'una manera uniforme dins la bateria.

EV 3.7.4 For lithium based cells, the temperature of at least 30 % of the cells must be monitored by the AMS. The monitored cells have to be equally distributed within the accumulator container(s).

Figura 5.28: Article EV 3.7.4 de la normativa de FSG2017

Així doncs, al tenir dotze Slaves i una Màster, i com cada placa conté dos sensors de temperatura, tindriem un total de vint-i-sis sensors per a monitoritzar la temperatura. Es veu, per tant, que no es compleix amb la normativa ja que això equival a un 25% del nombre total de cel·les.

És necessari la implementació d'una placa auxiliar que sigui capaç de monitoritzar la resta de temperatures que falten. Aquesta placa ha estat dissenyada i fabricada per l'equip i sensa un total de 15 temperatures. Veiem així que, amb una suma total de 41 sensors de temperatura s'abasta el 39.4% del nombre total de cel·les.

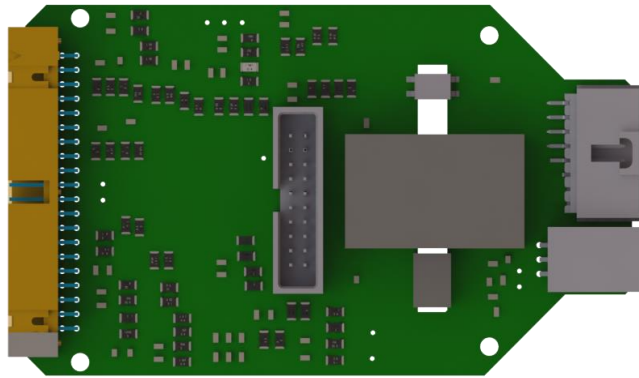


Figura 5.29: Placa auxiliar de sensat de temperatura

La localització d'aquesta placa, de la mateixa manera que amb la Màster, és la zona de control i gestió de la bateria.

5.3.1.1. Sensat de les cel·les

Una altra característica que s'ha volgut millorar respecte la temporada passada ha estat el sensat de voltatge de les cel·les.

Aprofitant que aquesta temporada el connexionat de potència es realitzarà mitjançant soldadura per ultrasò, s'ha dissenyat una placa de circuit imprès (PCB) per al sensat del voltatge.

Aquesta placa consta de varis *pads* on s'encastaran les busbars d'alumini i el sensat recorrerà les pistes de la PCB fins a un connector que posteriorment serà connectat al BMS.



Figura 5.30: PCB de sensat de voltatge de les cel·les

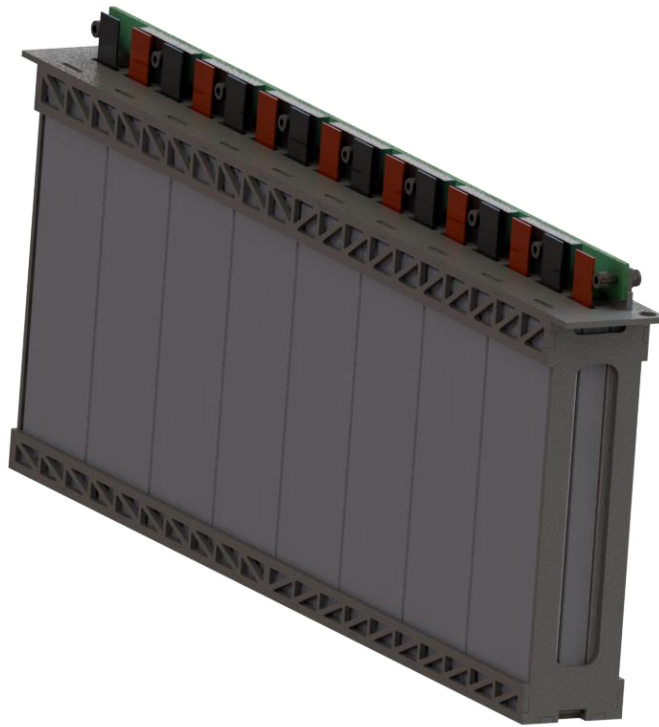


Figura 5.31: Aplicació de la PCB de sensat en un mòdul de la bateria

Tot i estar cada busbar encastada a la placa, per assegurar la rigidesa i robustesa del sistema la PCB estarà collada per un cargol que al mateix temps subjectarà també la busbar d'alumini.

Finalment comentar que la connexió que va des del connector de la PCB de sensat fins a la placa de BMS es realitzarà mitjançant el mateix cable utilitzat a la bateria de CAT09e: *AlphaWire*.

5.3.2. BMS ETSEIB Motorsport

Tal i com s'ha comentat a l'apartat. (...), l'equip durant aquesta temporada 2016/2017 ha realitzat un gran pas endavant i ha dissenyat un BMS que satisfaci les necessitats d'una bateria per a un cotxe de Formula Student.

El BMS és modular, de balanceig passiu i la seva tipologia, de la mateixa manera que per al BMS de *Freemens*, és de *Màster/Slave*. El xip que utilitza és el *BQ76PL536* de l'empresa *Texas instruments* i el micro és el *STM32F7*.

Cada placa *Slave* pot sensar de 9 a 18 canals de voltatge de cel·les i 6 canals de temperatura les dades de la qual són enviades per una xarxa de CAN aïllada.

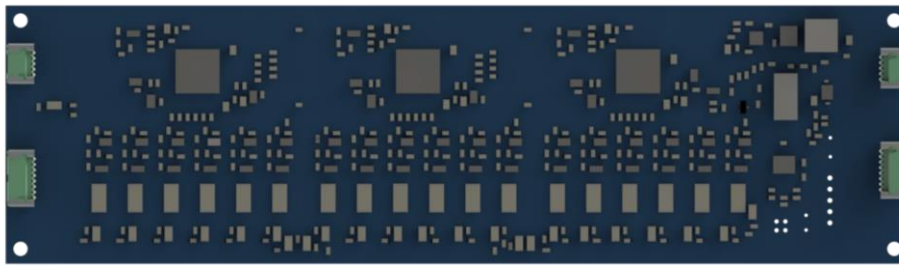


Figura 5.32: Placa BMS ETSEIB Motorsport

Així doncs, cada *Slave* utilitza 16 canals per a monitoritzar les 16 cel·les d'un Stack i els 6 canals de temperatura. Podem observar, per tant, que es compleix l'article EV 3.7.4 de la normativa [1] (figura 5.28) ja que es monitoritza la temperatura del **40.38%** de les cel·les.

La placa *Màster* s'encarrega de gestionar el funcionament de les *Slaves* però no realitza cap monitorització de cel·les.

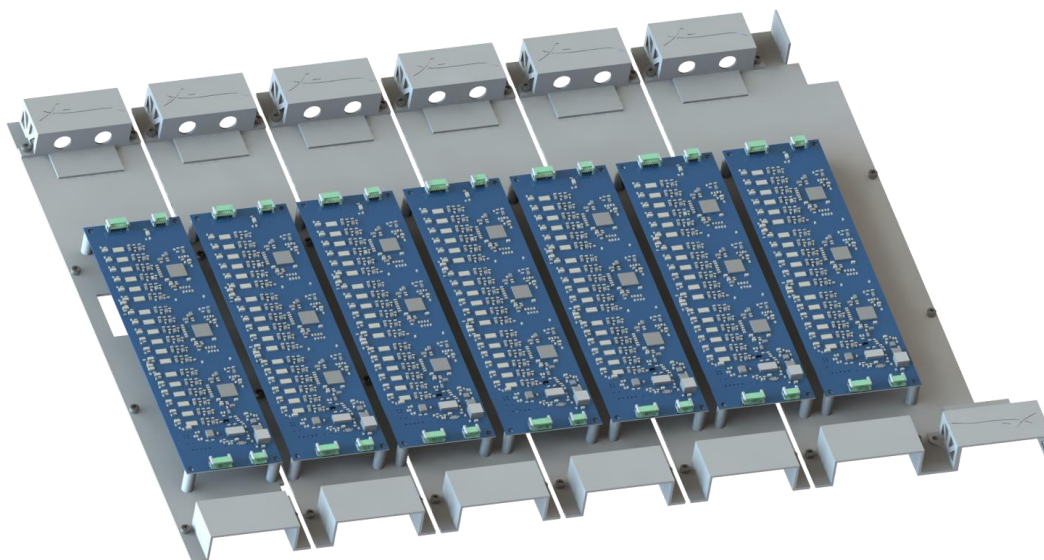


Figura 5.33: Implementació del BMS ETSEIB Motorsport

A la figura 5.33 es pot veure la implementació del BMS de l'equip a la bateria del CAT10e. Les tapes de sinteritzat de poliamida on es troben recolzades les plaques ja estan dissenyades per a poder implementar ambdós BMS.

Cal dir que aquest sistema encara està en fase de proves. Per a realitzar-les s'està utilitzant la *Evaluation board* del xip BQ76PL536 i la *Discovery board* STM32F407VGP. A dia d'avui ja s'ha aconseguit llegir el voltatge i temperatura de les cel·les i enviar les dades per la xarxa CAN.

5.4. Gestió de la bateria. Part de control

Per acabar la descripció de la bateria, en aquest apartat es descriuen els elements de control i seguretat instal·lats en la mateixa caixa de bateries, i que s'utilitzen per controlar el funcionament d'aquesta amb la resta d'elements.

A continuació es citen aquells elements que es mantenen respecte la bateria del CAT09e:

- *Accumulator Isolation Relays (AIR)* – Relés
- *Insulation Monitoring Device (IMD)*
- Sensor de corrent

Les fitxes d'especificacions dels components descrits a continuació es poden consultar a l'annex.

5.4.1. Fusible

El fusible utilitzat per a la bateria del CAT10e és *DIN 43653 Round Body Type Fuses 690V* de la marca *Westcode* [19].

Marca	Westcode
Tipus de fusible	<i>DIN 43653 Round Body Type Fuses</i>
Corrent continu	100 A
Voltatge màxim	690 VDC
Tipus de fusible	<i>Ultra Rapid</i>
I²T	3700 A ² s a 415 VDC
Corrent d'interrupció (màxim corrent al qual el fusible pot interrompre el corrent)	200 kA

Taula 5.23: Característiques principals del fusible

5.4.2. *Circuit de pre-càrrega i descàrrega*

A l'haver canviat el dimensionament de l'energia de la bateria de CAT10e respecte la de la temporada anterior, un dels canvis que provoca és el rang de treball del circuit de pre-càrrega. Si el voltatge màxim de la bateria és 436.8 V i per tal de complir amb l'article *EV 4.12.1* de la normativa [1], el sistema haurà de tancar el segon AIR als 393.12 V.

La implementació d'aquest circuit, igual que per a CAT09e, es realitzarà a partir d'un relé i una resistència.

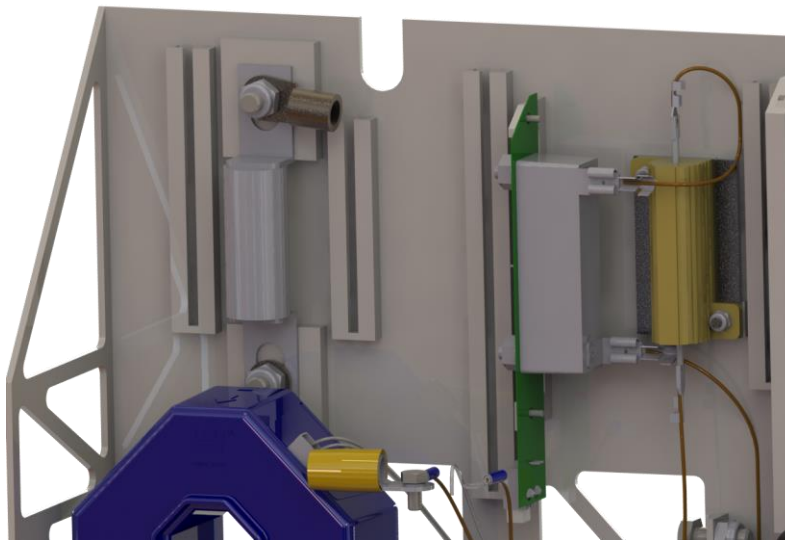


Figura 5.34: Localització del circuit de pre-càrrega dins la zona de control

Referent al circuit de descàrrega, la seva localització ha variat ja que aquesta temporada es trobarà situat dins l'inversor.

5.4.3. *Energy Meter*

La localització de l'*Energy Meter* ha estat un dels punts a millorar aquesta temporada. Després d'haver viscut tres competicions l'equip ha trobat necessari un canvi de situació ja que al trobar-se dins la caixa de bateries, provocava que si sorgia algun problema amb aquest element s'havia d'obrir la bateria.

Segons la normativa [1] i per seguretat, sempre que es treballi amb la bateria, ja sigui per a carregar-la o per a manteniment, s'ha de realitzar a la *Charging Area* una zona habilitada per la competició.

El temps de duració d'anar a la *Charging Area*, obrir la bateria, solucionar el problema sorgit amb l'*Energy Meter* i que posteriorment un jutge et verifiqui la bateria i la segelli de nou, és

un temps que un equip de competició ha d'evitar malgastar ja que pot ser crucial per al desenvolupament de les següents proves.

Així doncs per al CAT10e aquest element es troba dins una caixa d'alumini situada fora la bateria.

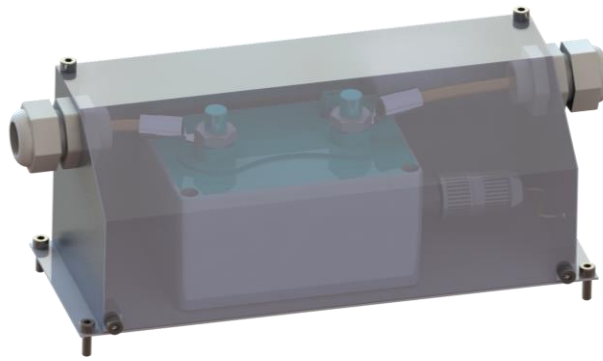


Figura 5.35: Situació de l'EM dins la caixa d'alumini

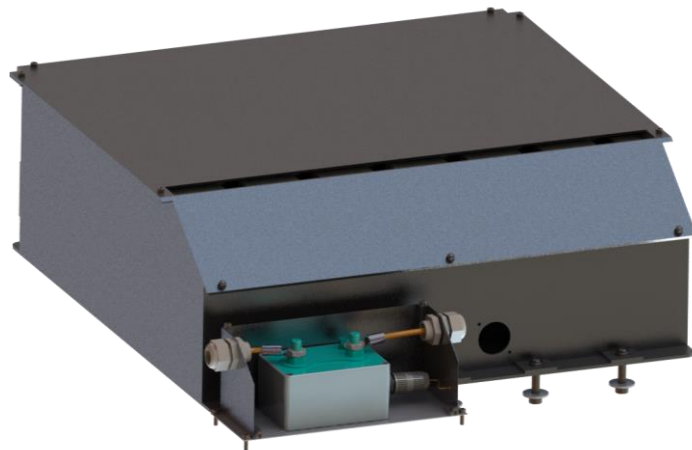


Figura 5.36: Localització de l'EM

5.4.4. **High Voltage Disconnect (HVD)**

Aquest dispositiu no es troba com a tal dins de la bateria, però la seva funció és interrompre el pas de corrent, obrint el circuit de potència mitjançant el sistema mecànic. Es troba instal·lat al darrere del vehicle, a una alçada de 400 mm.

La normativa [1] especifica a l'article *EV 4.7.2* que una persona no familiaritzada amb aquest element ha de ser capaç de desconectar-lo en menys de 10 segons.

EV 4.7.2 An untrained person must be able to remove the HVD within 10 seconds when the vehicle is in ready-to-race condition.

Figura 5.37: Article EV 4.7.2 de la normativa de FSG2017

Era difícil per una persona aliena desconectar en menys del temps especificat el mecanisme utilitzat a CAT09e i per aquest motiu s'ha decidit canviar-lo.

El connector utilitzat aquesta temporada és el *EM30MSD Series* de la marca *HRS* [20]. Conté un mecanisme de rotació que permet una connexió i desconexió més senzilla i lògica per a qualsevol persona.



Figura 5.38: HVD utilitzat al CAT10e

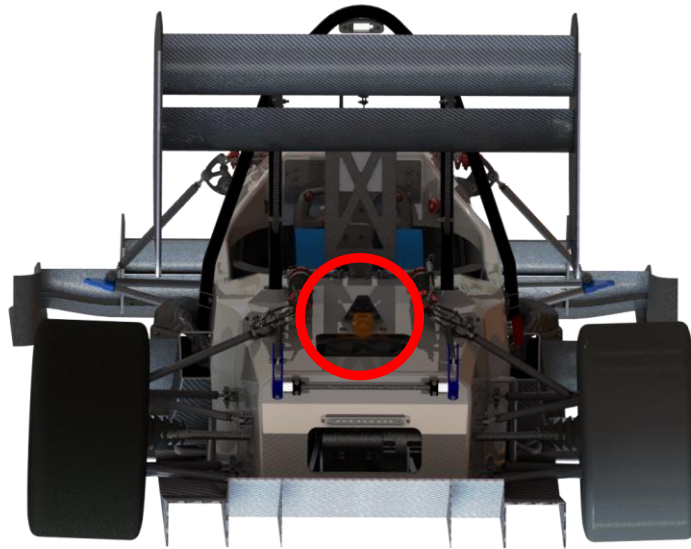


Figura 5.39: Localització de l'HVD al CAT10e

5.4.5. Muntatge de la zona de control

De la mateixa manera que es va dur a terme a CAT09e, per tal de facilitar el muntatge i el posterior manteniment de la zona de control, aprofitant de nou l'oportunitat que aporta el sinteritzat làser de poliamida, l'equip ha dissenyat un xassís per aquesta zona. Aquest element proporciona les subjeccions necessàries per als diferents elements i permet el muntatge fora de la bateria.

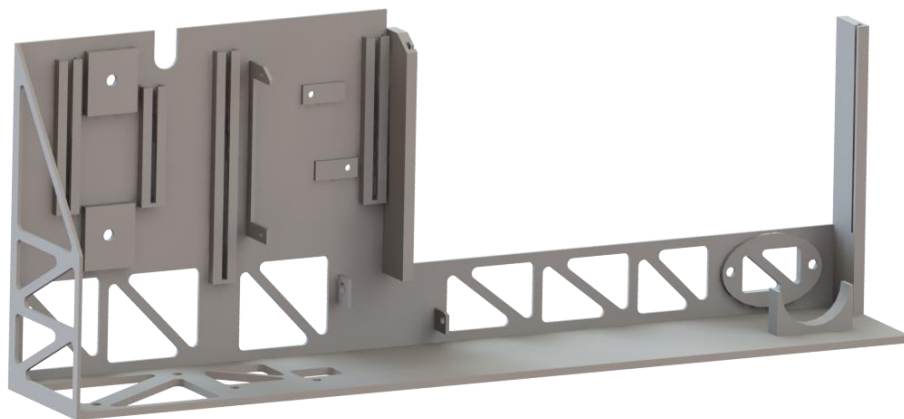


Figura 5.40: Xassís de poliamida

També s'han realitzat dos tapes per als elements d'alt voltatge que poden ser propensos a curtcircuits, com són el fusible i el circuit de pre-càrrega.

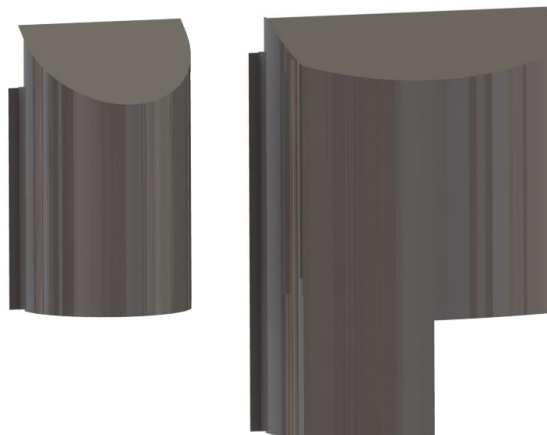


Figura 5.41: Tapa per al fusible (esquerra) i tapa per el circuit de pre-càrrega (dreta)

Tal com s'ha comentat a l'apartat 5.3 hi ha unes plaques del BMS localitzades a la zona de control. Aquestes estan collades a una làmina de fibra de vidre que s'encaixa al xassís de control.

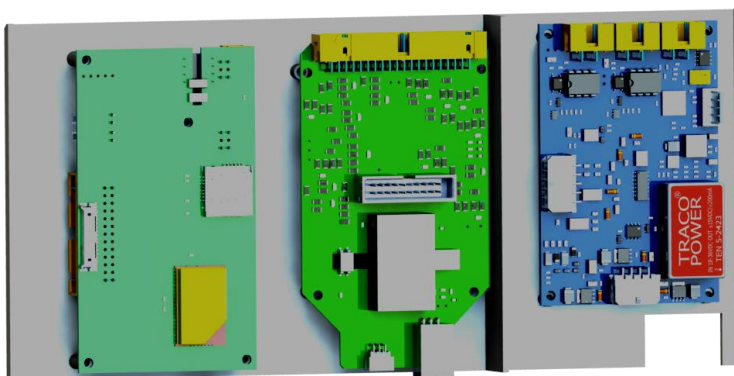


Figura 5.42: Màster, placa auxiliar de temperatures i PR

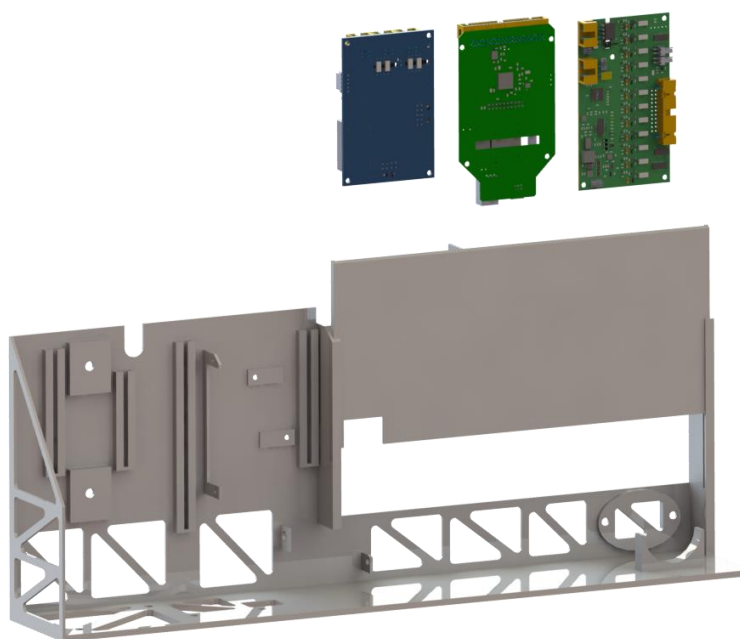


Figura 5.43: Vista explosionada de la localització del BMS a la zona de control



Figura 5.44: Vista isomètrica i planta de la zona de control

5.5. Refrigeració

Un dels objectius de la nova temporada era millorar la refrigeració de les cel·les dins la bateria. Tal com s'ha explicat anteriorment, a la bateria de CAT09e es va observar que les cel·les no eren refrigerades homogèniament. Una de les solucions plantejades i dissenyades per a aquesta temporada, per tal de millorar la seva refrigeració, ha estat el canvi d'orientació d'aquestes (explicat a l'apartat 5.2.4).

L'altre gran canvi respecte la temporada anterior és la canalització de l'aire. S'ha dissenyat una entrada que guia aquest aire des de l'exterior del vehicle fins a dins la bateria. Un cop dins, tal com es pot observar a les figures 5.45 i 5.47, s'ha prolongat aquesta entrada d'aire per tal de que la canalització de l'aire es divideixi una part cap al cos de les cel·les i l'altra part cap a les connexions de potència.

D'aquesta manera s'aconseguirà millorar la refrigeració interna de la bateria.

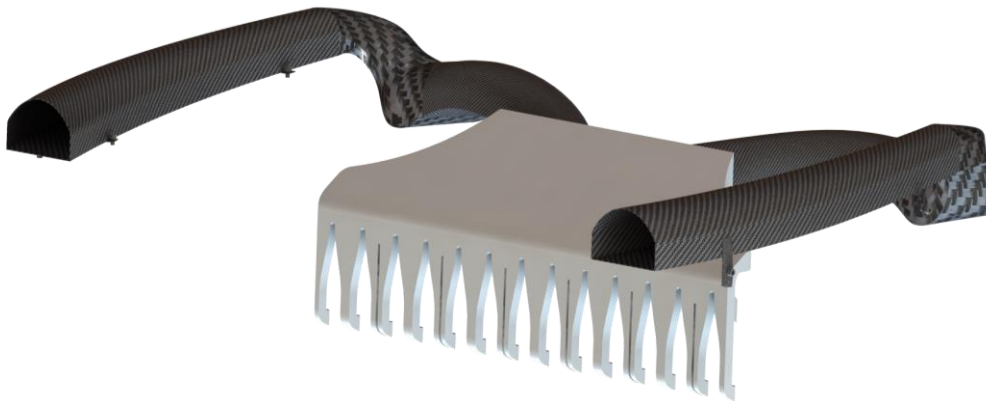


Figura 5.45: Entrada d'aire

A les figures 5.46 i 5.47 es pot veure la localització de l'entrada d'aire en el monocasc i com efectua la canalització de l'aire per fer-lo arribar dins la bateria.



Figura 5.46: Localització de l'entrada d'aire

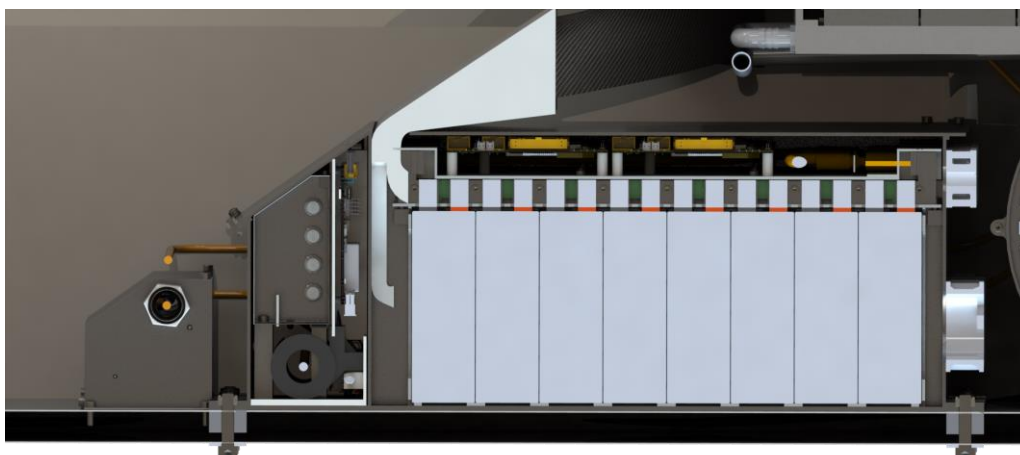


Figura 5.47: Vista seccionada de l'entrada d'aire a i la bateria.

Per últim, l'aire s'extreu de la bateria per mitjà d'uns ventiladors situats a la part posterior d'aquesta, tal i com es pot veure a la figura 5.48.

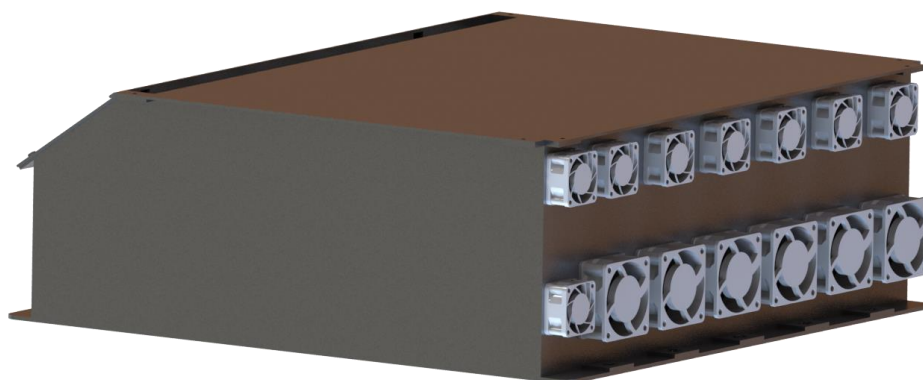


Figura 5.48: Extracció de l'aire de la mitjançant ventiladors

6. Estudi econòmic

Per a l'estudi econòmic del projecte es tenen en compte tres tipus de costos. En primer lloc els recursos humans necessaris tant en la fase de disseny com en la fase de construcció, en segon lloc tots els elements usats en la fase de disseny per al correcte desenvolupament del projecte i, per últim, altres recursos que tenen un impacte directe en el desenvolupament del projecte.

6.1. Recursos humans

El cost personal es divideix segons les tasques d'investigació i disseny dutes a terme durant el projecte. S'han comptabilitzat les hores que es dediquen a cada activitat i s'avalua el cost d'aquesta per hora. El total es quantifica en 58250 €, tal i com es pot veure desglossat en la taula 6.1

Activitat	Preu per hora	Hores	Cost
Investigació	45 €/h	100 h	4500 €
Disseny	45 €/h	600 h	27000 €
Experimentació	45 €/h	100 h	4500 €
Construcció	35 €/h	600 h	21000€
Redacció	25 €/h	50 h	1250 €
Total		1450 h	58250 €

Taula 6.1 Costos generats per recursos humans

6.2. Recursos materials

Els principals materials i components emprats per a la fabricació de la bateria es detallen en la següent taula:

	Element	Preu unitari	Unitats	Cost
	Cel·les	19,55 €/uni	430 uni	8406,50 €
	Alumini caixa de bateries			296,66 €
	Alumini			100 €
Connexionat	<i>Maintenance plug</i>	7 €/uni	40 uni	280 €
	Poliamida			5000 €
	Màster	180 €/uni	1 uni	180 €
	<i>Slave</i>	130 €/uni	12 uni	1560 €
BMS	<i>FreeSB-PR</i>	130 €/uni	1 uni	130 €
	Sonda corrent	90 €/uni	1 uni	90 €
	Cablejat i connectors			300 €
	Zona de control			500 €
Total				16843,16 €

Taula 6.2: Costos generats per recursos materials

A la despesa de material s'han d'afegir costos addicionals que es detallen a continuació:

Concepte		Cost
Impostos (aranzels + IVA)	Cel·les (30%)	2521,95 €
	BMS (21% IVA)	393 €
	Alumini caixa de bateries	149,10 €
Transport	BMS	100 €
	Alumini caixa de bateries	628,27 €
Total		3792,32 €

Taula 6.3: Costos addicionals deguts a impostos, taxes i transport

6.3. Recursos de desenvolupament

Finalment es compten les despeses generades degut a la utilització de recursos que, sense tenir una implicació directa, són necessaris pel compliment dels objectius del projecte.

Concepte		Cost
Llicències	Matlab	1800 €
	SolidWorks	400 €
	Microsoft Office	600 €
	DataAnalysisPro	320 €
Equips informàtics		125 €
Equipament de laboratori		4500 €
Total		7745 €

Taula 6.4: Costos de desenvolupament

6.4. Cost total del projecte

Sumant tots els costos anomenats als apartats anteriors, el cost total del projecte ha estat de 86630,48 €.

Concepte	Cost
Recursos humans	58250 €
Recursos materials	16843,16 €
Recursos de desenvolupament	7745 €
Costos addicionals	3792,32 €
Total	86630,48 €

Taula 6.5: Cost total del projecte

7. Impacte ambiental

La mala gestió pel que fa al desconexament de com realitzar un desmantellament d'un equip elèctric o com causar el menor impacte amb els residus que genera una bateria amb la qual s'ha tractat, pot causar problemes diversos. Per una banda, es pot malmetre el medi ambient, el nostre entorn i, fins i tot, pot tenir conseqüències en la salut de les persones.

És per això que s'ha dut a terme un treball específic per saber quina podria ser la petjada ecològica d'aquest projecte.

7.1. Cel·les

Gràcies a la informació facilitada pel fabricant de les cel·les, *Melasta*, en la taula 7.1 es presenta la composició de les cel·les.

Composició química	Nº de cas	Percentatge en pes (%)
Diòxid de cobalt de liti	12190-79-3	20-35
Alumini	7429-90-5	10-15
Liti	7439-93-2	10-15
Liti Hexafluorofosfat	21324-40-3	3-7
Carboni negre	1333-86-4	2-5
Níquel	7440-02-0	1-2
Polifluorur de Vinilidè	24937-79-9	3-6
Grafit	7782-42-5	10-16
Coure	7440-50-8	15-20

Taula 7.1: Composició de les cel·les

Tots els components de les cel·les compleixen amb la normativa RoHS (Restriction of Hazardous Substances). A més, la Directiva 2012/19/UE de RAEE [22] permet gestionar l'eliminació de les cel·les portant-les a qualsevol punt verd, sense haver de realitzar cap altre acció un cop finalitzada la seva vida útil.

7.2. Alumini

Tot i que l'alumini es tracti d'un material totalment reciclable sense que aquest procés minvi les seves propietats mecàniques, de la conformació d'aquest material es poden derivar diferents productes nocius per al medi ambient, a més la seva producció comporta un gran consum energètic (només per produir una tona d'alumini són necessaris 15000kW·h).

Durant la producció de l'alumini es forma el llot vermell, que pot provocar la degradació de les aigües superficials i freàtiques amb les quals està en contacte. És important eliminar aquest residu per tal de no provocar un greu impacte negatiu en el medi ambient. També és necessari eliminar les emissions produïdes durant la crema de combustible, les emissions del procés d'electròlisi de formació de l'alumini i les corrents de sobrants líquids. A més, la producció del material genera grans quantitats de pols i s'emanen grans volums de gasos tòxics, com alguns compostos d'arsènic o diòxids de sofre.

A part de tots aquest residus nocius derivats de la conformació del alumini, produir alumini provoca la desforestació de les zones riques en bauxita (matèria prima de l'alumini).

Per aquests motius, és cada cop més abundant el reciclatge de l'alumini. El procés de reciclatge d'aquest material només necessita el 5% de l'energia necessària per produir el material primari inicial. A més, d'un gran estalvi energètic, també suposa un gran estalvi econòmic i una gran reducció dels residus contaminants produïts per la formació de l'alumini.

7.3. Poliamida

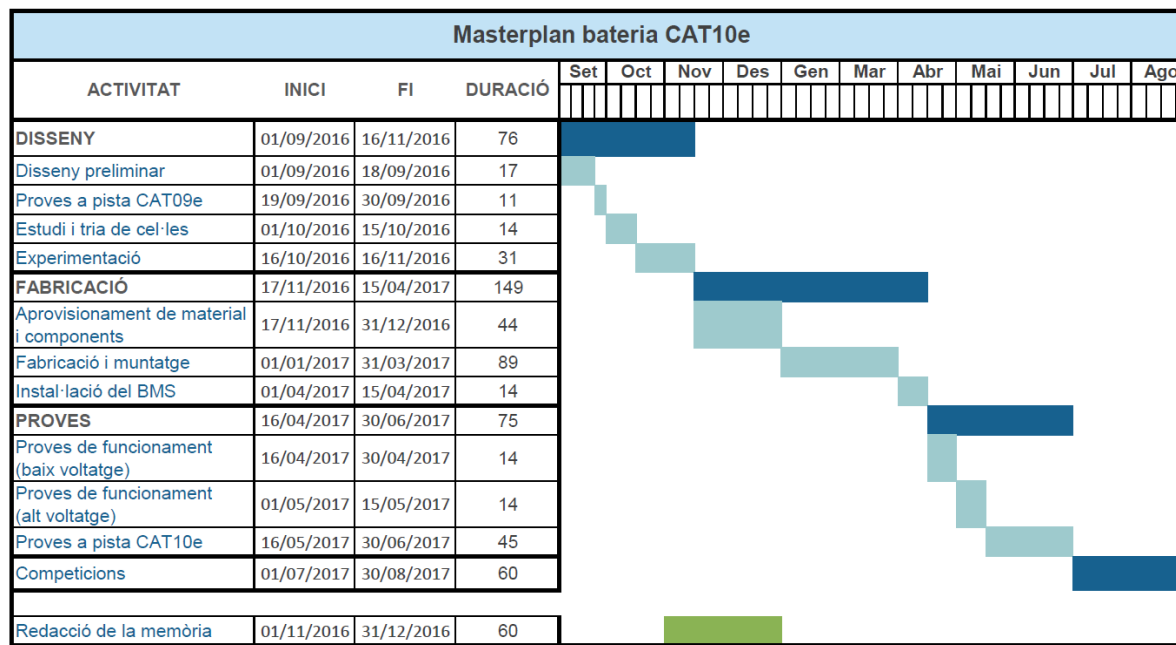
La poliamida és un material fàcilment reciclable. Un cop s'ha arribat al final de la seva vida útil, s'acostuma a emprar aquest plàstic per a la fabricació de productes de baixa qualitat com caixes o elements de construcció. A més a més el material reciclat pot ser barrejat, en una determinada quantitat, amb material verge per a la fabricació de productes de més alta qualitat, com ara ampolles [23].

7.4. Plaques de circuit imprès (PCB)

Pel que fa a les PCB del BMS i a la resta de plaques de circuit imprès de la bateria, han estat dissenyades amb compliment de la Directiva 2012/19/UE de RAEE [22]. Per tant, de la mateixa manera que amb les cel·les, aquestes poden ser entregades a un punt verd pel seu correcte reciclatge.

8. Planificació del projecte

La planificació del projecte es divideix en tres etapes principals: disseny, fabricació i proves repartides en un any tal i com s'exposa a la taula següent:



Taula 8.1: Planificació del projecte

9. Conclusions

El projecte *Disseny i millora de la bateria d'un vehicle elèctric de competició per la Fórmula Student* compleix amb els objectius que es van marcar inicialment, ja que s'ha mostrat l'evolució en el disseny de la caixa de bateries per al CAT09e i el CAT10e, justificant tots i cadascun dels canvis, especialment ressaltant les carències i defectes que s'havien detectat així com els que van anar sorgint en el transcurs del projecte.

Després de la temporada 2015/2016, dissenyant i construint el CAT09e, on es va poder aprendre i guanyar experiència, s'entra en el període CAT10e, d'aquesta fase s'arriben a les següents conclusions:

- A les primeres fases de tests en pista i amb totes les dades recopilades es va poder realitzar un estudi de dimensionament de l'energia i d'aquesta manera poder complir amb l'objectiu de dissenyar una bateria que fos capaç de realitzar una *Endurance* a un ritme alt.
- Relacionat amb el punt anterior, es van escollir unes cel·les amb més capacitat nominal i menys resistència interna, més òptimes que les anteriors alhora de satisfer l'estudi de l'energia.
- Gràcies a l'experimentació al laboratori d'electrònica de potència es va veure que el rendiment d'una connexió soldada per ultrasons era clarament més òptim que el d'una connexió cargolada. També es va veure que, tant coure com alumini eren materials igual de vàlids per a realitzar la connexió elèctrica entre cel·les.

A més a més, amb aquest document es pretén recopilar un seguit de directrius a tenir en compte alhora de dissenyar futures bateries. Les principals directrius són:

- Primerament, tot i no ser un objectiu del projecte, comentar la importància dels sistemes d'adquisició de dades. És fonamental disposar de dades per tal de no basar totalment el disseny en models matemàtics i simulacions les quals, habitualment, incorporen idealitzacions difícilment assolibles físicament.
- Pel que fa al sistema de monitorització de la bateria. Gràcies a l'experiència i recomanacions de membres d'anys anteriors de fer un pas endavant, s'han pogut posar en pràctica els coneixements adquirits i dissenyar un BMS que satisfaci les exigències tant de la bateria d'un vehicle de competició com d'una normativa de seguretat molt estricta.

- Comentar també, tot i no ser objecte principal d'aquest projecte, la refrigeració. Al final de la temporada 2015/2016 es va poder veure que no únicament les connexions de potència, les busbars, han de ser l'únic objectiu del sistema de refrigeració. Tant el BMS com els cossos de les pròpies cel·les també són elements que cal tenir en compte alhora de dissenyar la refrigeració de la bateria.

A títol personal:

- S'ha ampliat molt el coneixement amb programari CAD.
- Els coneixements elèctrics que ja s'havien adquirit durant la carrera s'han ampliat amb el tractament de bateries electroquímiques i els diferents elements de potència.
- S'han après noves dinàmiques de treball en equip.

Finalment comentar que, totes les conclusions explicades anteriorment s'han extret a partir de l'experiència obtinguda durant les temporades anteriors i a partir dels resultats de diferents proves al laboratori. A partir d'aquest moment, i fins a l'època de competicions, aquestes decisions s'hauran de validar a la bateria del CAT10e durant les posteriors proves a pista del monoplaça.

Agraïments

M'agradaria agrair al tutor del projecte, el professor Daniel Montesinos, per tota l'ajuda i suport alhora de resoldre dubtes i prestar el seu punt de vista a dificultats, no tan sols amb els temes relacionats amb aquest projecte sinó també durant el dia a dia de l'equip. Tenir la veu de l'experiència que ell representa ens enriqueix a tots enormement.

Agrair a l'equip, ETSEIB Motorsport, a tots i cadascun dels integrants que han format part de l'equip durant les dues temporades, pel seu esforç i dedicació que han fet possible que el CAT09e i el CAT10e siguin una realitat.

Agrair especialment als membres del departament de *Powertrain*, pel seu compromís, la seva feina i la seva bona predisposició alhora d'afrontar els reptes que es plantegen dia a dia, sense ells no hagués estat possible aquest projecte.

Finalment, agrair també als familiars i amics, pel seu recolzament, per escoltar-me i per la seva paciència i comprensió davant la meva absència durant aquestes dues temporades les quals he passat moltes més hores a la universitat que a casa.

A tots vosaltres gràcies per haver-me ajudat a tirar endavant el projecte.

Bibliografia

Referències bibliogràfiques

- [1] **FORMULA STUDENT GERMANY.** *Formula Student Rules 2017*. [pdf] 30 de novembre de 2016.
- [2] **ETSEIB Motorsport.** ETSEIB Motorsport. [En línia] <http://www.etseib-motorsport.upc.edu/>
- [3] **Serra, Victor Calvo.** *Caracterització i simulació d'un vehicle de competició elèctric de la Formula Student*. Barcelona: s.n., 2015
- [4] **Font, Miquel Gaig.** *Evolució del sistema d'emmagatzematge d'energia d'un vehicle de la Formula Student*. Barcelona: s.n., 2015
- [5] **Sierra, Ian Cusiné.** *Disseny i millora del sistema d'evacuació de calor de la bateria d'un cotxe de Formula Student*. Barcelona: s.n., 2016
- [6] **Sayol, Sergi Catalan.** *Anàlisi estructural de solucions constructives de la caixa de bateries per un vehicle de Formula Student elèctric*. Barcelona: s.n., 2016
- [7] **Moles, Manel Duran.** *Disseny i millora del connexionat de potència de la bateria d'un Formula Student*. Barcelona: s.n., 2016
- [8] **Melasta.** *Product Specification Polymer Li-ion Battery 3.7V 6350mAh 15C (Model No.: SLPBA843126)*. [pdf]
- [9] **Unitek.** *MANUAL Digital Battery-Motor-Controller BAMOCAR-D3*. [pdf]
- [10] **Freemens.** *FreeSB FSB-PR-02*. [pdf]
- [11] **Tyco Electronics.** *Kilovac LEV100 Series 900 Vdc Contactor*. [pdf]
- [12] **Cooper Busmann.** *High Speed Fuses. British BS 88-690V: 6-710A*. [pdf]
- [13] **Bender.** *Isometer® IR155-3203/IR155-3204*. [pdf]
- [14] **LEM.** *Current Transducer LA 305-S/SP1*. [pdf]
- [15] **Melasta.** *Li-Polymer Battery Module List (High Drain Type)*. [excel] 2016

- [16] **Melasta.** *Product Specification Polymer Li-ion Battery 3.7V 6600mAh 15C (Model No.: SLPBB042126).* [pdf]
- [17] **Multi-Contact Stäubli Group.** *Powerline, Round Connectors.* [pdf]
- [18] **Freemens.** *FreeSafe Extended FS-XT.* [pdf]
- [19] **Freemens.** *FreeSafe FS02-M/S.* [pdf]
- [20] **Westcode.** *Ultra Rapid Semiconductor Protection Fuse. DIN 43653 Round Body Type Fuses 690V.* [pdf]
- [21] **Hirose Electric CO.** *EM30MSD Series.* [pdf] 1 de Gener de 2017
- [22] **Diario Oficial de la Unión Europea.** *Directiva 2012/19/EU* [pdf]
- [23] **Viquipèdia.** *Poliamida.* [En línia] <https://ca.wikipedia.org/wiki/Poliamida>

Bibliografia complementària

<http://es.slideshare.net/peibanez/impacto-ambiental-del-acero-y-aluminio>